Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2024-06-01

繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価に関する研究

北澤，裕明

(Degree)
博士（工学）
(Date of Degree)
2015-09-25
(Date of Publication)
2016-09-01
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲第6493号
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006493

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

博　士　論　文

繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価に関する研究

Evaluation of Damage Due to Cumulative Fatigue to Packaged Products

2015 年 7 月

神戸大学大学院海事科学研究科

北澤　裕明

要　旨

繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価に関する研究

北澤裕明

被包装物の輸送中における蓄積疲労損傷を防止するために、これまでに損傷の評価、再現および対策に関する研究が行われてきた。それらの研究における蓄積疲労要因としては、主に振動が想定されてきた。しかし、この要因として衝撃は想定されてこなかった。一方、衝撃による被包装物の易損性を評価するために、衝撃印加時のピーク加速度（Peak Acceleration。以下、*PAcc*）および速度変化（Velocity Change。以下、*Vc*）の組み合わせに対応する損傷限界曲線（Damage Boundary Curve。以下、DBC）を導出する手法が理論化され、これに基づく緩衝包装設計が行われてきた。しかし、この理論において、被包装物が損傷するまでの衝撃繰り返し回数（以下、*N*）は考慮されてこなかった。

農産物のように、被包装物の中には輸送中に繰り返し衝撃を受けることにより疲労が蓄積し損傷するものがある。従って、このような被包装物の繰り返し衝撃による損傷を防止するための包装設計においては、*PAcc*、*Vc* および *N* を考慮した評価手法の導入が必要である。

これらの点を踏まえた上で本研究は、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷に関する評価を行い、この結果に基づき損傷を制御するための包装設計手法を提案することを目的とした。

本論文は、この目的を達成するために、以下に示す 7 つの章から構成されている。

第 1 章では、被包装物もしくは物品の蓄積疲労損傷を評価するための理論の 1 つに、S-N 曲線理論があり、これまで、この理論を応用した繰り返し応力や振動による材料および物品の損傷評価が行われてきたことを述べた。

第 2 章では、イチゴ果実を対象として S-N 曲線理論を応用した蓄積疲労損傷評価を行い、*PAcc* と *N* の関係を S-N 曲線により表すことができること、およびこ

の曲線を用いることにより、繰り返し衝撃により損傷する被包装物の蓄積疲労損傷を評価できることを実証した。

第３章では、第２章で未検討とした *N* に及ぼす *Vc* の影響について検討するために、物品に衝撃を繰り返し印加した際における *PAcc* と対となる *Vc* の違いが *N* に及ぼす影響を検証し、繰り返し衝撃による物品の蓄積疲労損傷の発生において衝撃１回あたりの損傷度（*N* の逆数。以下、*d*）が *PAcc* と *Vc* の組み合わせにより様々に変化することを実証した。さらに、この点を踏まえ、*PAcc* と *Vc* の組み合わせ条件が多様となる実輸送環境を想定した上で蓄積疲労により損傷する被包装物の損傷評価および包装設計を行う場合、それらの組み合わせに対応する *d* を想定する必要があることを提言した。

第４章では、第３章においてその可能性を提示した繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の発生に及ぼす *PAcc* と *Vc* の組み合わせの影響を、実輸送で用いられる包装条件下で検証した。繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価を *PAcc* および *d* の関係のみにより実施した場合、*d* の値に誤差が生じることを実証した。さらに、任意の *PAcc* と *Vc* の組み合わせから導出される *d* に対応する DBC を提示し、繰り返し衝撃による損傷評価において DBC が応用できることを証明した。

第５章では、第４章に引き続き、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の発生に及ぼす *PAcc* と *Vc* の組み合わせの影響を、実輸送で用いられる包装条件下で検証することとし、多段積みされた包装形態における段（部位）の違いが被包装物の *d* に及ぼす影響を検証した。

その結果、多段積み包装において段の違いにより任意の *PAcc* に対応する *Vc* が様々に変化することを実証するとともに、任意の衝撃が印加された際の *d* が段により異なることを明らかにした。また同時に、その理由が *Vc* の影響によることを明らかにした。さらに、これらの結果を通して多段積み包装される被包装物の緩衝包装設計において、特定の段における *PAcc* および *Vc* に基づいて算出した *d* を用いて、それ以外の段における損傷を見積った場合、包装全体における損傷程度を見誤る危険性があることを証明した。

第６章では、第５章の検証を踏まえ、まず多段積みされた被包装物の損傷を制御するための方法について検討し、包装容器と包装容器の間もしくは包装全体の最底面に、板またはシート状の緩衝材を配置することにより、段ごとの *PAcc*、*Vc*

を様々に変化させることができることを明らかにした。次に、$PAcc$ および Vc を説明変数、d を目的変数とした重回帰分析を行い、これらの変化により、d が最大となる段を様々に変化させることができることを証明するとともに、この変化を利用した、異なる易損性を有する被包装物の混載を可能とする多段積み包装方法を提案した。

第7章では、第2章から第6章における実験結果を踏まえた本研究の結論として、衝撃印加時における $PAcc$ と Vc の組み合わせに対応する d を考慮することにより、被包装物の蓄積疲労損傷を制御することを可能とする包装設計が実現できることを述べた。

以上、本論文は繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価を $PAcc$、Vc および d の3要因を考慮することにより実施しなければならない理由を、実輸送で用いられる包装形態を用いた実証試験を通して証明するとともに、それらの3要因を考慮した損傷防止のための包装方法を提案するものである。本研究の成果は、合理的な緩衝包装設計の確立に資することが期待でき、貨物の安全輸送を支える包装技術の向上に貢献できる。

Abstract

Evaluation of Damage Due to Cumulative Fatigue to Packaged Products

Hiroaki KITAZAWA

To prevent damage to packaged products caused by cumulative fatigue during transport, many studies have been conducted on the evaluation of, reproduction of, and measures against such damage. In such studies, vibrations have been considered as the main factor that induces cumulative fatigue damage, while shock has been neglected. However, one theory argues that the shock fragility of products should be evaluated by using a damage boundary curve (DBC) corresponding to the combination of the peak acceleration (*PAcc*) and velocity change (*Vc*). Cushioning packaging has been designed based on this theory. However, this DBC theory does not consider the shock frequency with respect to damage (*N*). Cumulative fatigue caused by repetitive shocks during transport can damage packaged products such as agricultural products. Thus, damage evaluation methods for the design of packaging for such products should consider not only *PAc*c and *Vc* but also *N*. The purpose of this study was to develop a packaging system that can control the damage to products through an evaluation of the cumulative fatigue damage caused by repetitive shock.

This thesis consists of seven chapters:

Chapter 1 applies the S–N curve theory to evaluating the damage to products subjected to cumulative fatigue caused by vibrations and/or repeated stress.

Chapter 2 presents an evaluation of the cumulative fatigue damage to

strawberries as a representative packaged product. The relationship between *PAcc* and *N* can be expressed as an S–N curve, which can be applied to evaluating the damage to packaged products from cumulative fatigue caused by repetitive shock.

Chapter 3 discusses the influence of different values of *Vc* on *N* of products subjected to repetitive shock because this was neglected in Chapter 2. The degree of damage per shock (*d*: inverse of *N*) to strawberries is demonstrated to depend on different combinations of *PAcc* and *Vc*. For *d*, which corresponds to the combination of *PAcc* and *Vc*, the damage to products subjected to cumulative fatigue caused by repetitive shock should be considered because *PAcc* and *Vc* vary under actual transport conditions.

Based on the results of Chapter 3, Chapter 4 discusses the influence of different combinations of *PAcc* and *Vc* on the occurrence of repetitive-shock-induced damage to strawberries as a representative packaged product. The results showed that errors occurred when repetitive-shock-induced damage was predicted using only the relationship between *PAcc* and *d*. Preparing a DBC corresponding to *d* as determined from the combination of *PAcc* and *Vc* may increase the accuracy of the predicted repetitive-shock-induced damage to products due to cumulative fatigue.

Chapter 5 considers the influence of different layers on the repetitive-shock-induced damage to strawberries packaged in a five-layer corrugated fibreboard box. The results showed that *d* of the packaged product varies for different box layers. This variation may be due to the changes in *PAcc* and *Vc* corresponding to the different layers. The results indicated that the different *PAcc* and *Vc* corresponding to different layers should be considered in order to prevent products inside stacked packaging from sustaining damage caused by repetitive shock.

Based on the results in Chapter 5, Chapter 6 presents a method to estimate the damage to products in stacked packaging by considering *d* at each layer. The estimation results indicated that the values of *PAcc* and *Vc* corresponding to the drop shock at each layer in stacked packaging can be

controlled by laying board- or sheet-like cushioning materials between each layer or outside the bottom layer. The estimation results were obtained by multiple regression analysis to calculate a specific value of *d* with *PAcc* and *Vc* as explanatory variables and *d* as the objective variable. The results indicated that the layer having the maximum *d* (d_{Max}) can change depending on the cushioning material. The possibility of developing a mixed packaging system for products with varying fragilities to prevent damage from cumulative fatigue is proposed.

Finally Chapter 7 presents the conclusions of this study: suitable packaging for controlling damage to products subjected to cumulative fatigue caused by repetitive shocks can be achieved by considering *d* corresponding to the combination of *PAcc* and *Vc*.

This thesis demonstrates that the damage to packaged products from cumulative fatigue should be estimated by considering *PAcc*, *Vc*, and *d* and proposes a packaging system based on those three factors. The results will contribute to advances in reasonable cushioning packaging and packaging engineering in support of safe distribution for packaged freight.

目　次

第１章　序　論 1

1.1　本研究の背景 1

1.2　理論の現状 2

1.2.1　損傷限界曲線（DBC）理論 2

1.2.2　S-N 曲線理論 4

1.2.3　蓄積疲労を考慮した DBC 理論 6

1.3　本研究の目的および方針 8

1.4　本論文の構成 8

第２章　S-N曲線理論の応用による被包装物の蓄積疲労損傷評価 14

2.1　緒　言 14

2.2　実　験 14

2.2.1　試　料 14

2.2.2　包装形態 14

2.2.3　落下試験およびピーク加速度（*PAcc*）の計測条件 15

2.2.4　試料の損傷評価 15

2.2.5　目視による損傷評価の妥当性 18

2.3　実験結果 18

2.3.1　落下高（*h*）と *PAcc* の関係 18

2.3.2　*PAcc* および衝撃繰り返し回数（*N*）の関係 20

2.3.3　*PAcc* と *N* の関係式の妥当性検証 21

2.4　結　言 21

第３章　繰り返し衝撃による物品の損傷発生における速度変化（*Vc*）の影響評価 23

3.1　緒　言 23

3.2　実　験 23

3.2.1　試　料 23

3.2.2　衝撃条件の作成 23

3.2.3　試料の損傷評価 27

3.3　実験結果および考察 27
3.4　結　言 29
第４章　実輸送を想定した包装条件下における蓄積疲労損傷評価（１）
緩衝材の違いが繰り返し衝撃による被包装物の損傷発生に
及ぼす影響 31
4.1　緒　言 31
4.2　実　験 31
4.2.1　実験の方針 31
4.2.2　包装条件 32
4.2.3　*h*に対応する*PAcc*および*Vc*の計測条件 34
4.2.4　落下試験条件 34
4.2.5　試料の損傷評価 35
4.2.6　*h*に対応する衝撃１回あたりの損傷度（*d*）の算出 35
4.3　実験結果および考察 36
4.3.1　*h*に対応する*PAcc*および*Vc* 36
4.3.2　*h*に対応する*d* 38
4.3.3　*d*を考慮したDBCの導出 41
4.4　結　言 42
第５章　実輸送を想定した包装条件下における蓄積疲労損傷評価（２）
多段積み包装された被包装物の損傷発生に及ぼす繰り返し
衝撃の影響 44
5.1　緒　言 44
5.2　実　験 45
5.2.1　実験の方針 45
5.2.2　試　料 45
5.2.3　包装条件 45
5.2.4　*PAcc*および*Vc*の計測および落下試験条件 47
5.2.5　１段目における*h*と*PAcc*および*Vc*の変換 47
5.2.6　試料の損傷評価 47
5.3　実験結果および考察 48
5.3.1　*h*と*PAcc*および*Vc*の関係 48

5.3.2　1段目と2段目～5段目における *d* の比較 50
5.4　結　言 55
第6章　蓄積疲労損傷の制御を可能とする包装方法の提案 57
6.1　緒　言 57
6.2　理　論 57
6.2.1　重回帰分析による *Vc* および *PAcc* の組み合わせから
推定される *d* の算出 57
6.3　実　験 60
6.3.1　板状緩衝材を用いた落下試験における *Vc* および *PAcc*
の測定条件 60
6.3.2　各段における *d* の推定 61
6.4.　実験結果および考察 63
6.4.1　重回帰分析による *Vc* および *PAcc* の組み合わせに対応
する *d* の推定 63
6.4.2　各緩衝材およびそれらを配置する部位が各段における
Vc および *PAcc* に及ぼす影響 63
6.4.3　各段における *d* の推定 65
6.5　結　言 67
第7章　結　論 70
記号表 73
謝　辞 74

第１章　序　論

1.1　本研究の背景

国内企業における生産拠点の海外移転[1)]や海外への国産農産物の輸出[2),3)]などに起因する物流のグローバル化が進展している。このことにともない、従来想定されてこなかった長時間の輸送にさらされることとなった被包装物が存在するものと考えられる。長時間の輸送においては、被包装物が輸送中に振動および衝撃にさらされる時間が長くなることに加え、積荷の載せ換えといった人的な衝撃発生要因にさらされる機会が多くなるものと想定される。さらに海外においては、日本国内と比較し、道路環境およびトラックなどの輸送機関が未発達の地域もあり、そのような地域においては、被包装物が日本国内では想定されないような過酷な振動および衝撃にさらされることも報告されている[4)]。

物品の中には、1 回の応力によっては損傷しないものの、繰り返し応力を受けることにより疲労が蓄積し損傷、すなわち蓄積疲労により損傷するものがある[5),6)]。上述したような輸送環境下においては、被包装物の蓄積疲労損傷の発生が懸念される。この点を踏まえ、これまで工業製品を対象とした蓄積疲労損傷の評価および再現に関する研究が行われてきた。例えば、津田ら[7)]は、被包装物の振動耐久性を蓄積疲労に基づき評価することにより、シミュレーション試験における損傷再現性の向上を図った。また、細山・中嶋[8)]により振動波形における尖度を考慮することによる非ガウス型ランダム振動の生成法が提案され、実輸送におけるショック・オン・ランダム振動を忠実に再現した上で蓄積疲労損傷評価を行うことが可能となった。

蓄積疲労により損傷する被包装物の代表的な例としては、野菜や果物といった農産物が挙げられる。これまでレタスおよびイチゴ果実を対象として輸送中における損傷を蓄積疲労評価モデルによって予測、または再現しようとする取り組みが行われてきた[9)~12)]。さらに、農産物の蓄積疲労損傷を再現するために、損傷度の周波数依存性を考慮した試験方法も提案されている[13)]。しかし、ここで述べた工業製品および農産物のいずれを対象とした研究においても、輸送中における繰り返し応力の発生要因として想定されてきたのは主として振動である。一方、繰

り返し応力の発生要因として衝撃を想定した研究事例は少ない。この理由として、工業製品の緩衝包装設計においては、1 回の衝撃により被包装物が損傷するかどうかという点に主眼が置かれてきたこと [14] が挙げられる。農産物を対象とした研究においては、モモ果実を対象として衝撃による損傷部位における細胞の観察 [15] や損傷評価のための衝撃印加条件の提案に関する研究 [16] が行われている。さらにリンゴ果実を対象として、衝撃加速度の違いが損傷部位の面積および体積に及ぼす影響の評価が行われている [17),18]。しかし、これらの研究においても、1 回の衝撃による損傷が評価の対象とされており、繰り返し衝撃の影響については検討されていない。一方、池田ら [19]は、レモン果実の収穫から選果工程における衝撃発生状況を解析し、繰り返し衝撃が果実の損傷発生要因となっている可能性を指摘した。さらに、繰り返し衝撃に起因する衝撃エネルギーの累積をパラメータとした数式モデルを用いて、貯蔵中におけるレモン果実の腐敗発生を予測する手法を提案した [20]。これらのレモン果実を対象とした研究は、物品の輸送中における損傷を評価し、これを防止するための緩衝包装を設計するためには、繰り返し応力の発生要因として繰り返し衝撃を考慮する必要性を示唆している。

以上に述べた物流の現状および既往研究の状況を踏まえると、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷を評価するための新たな手法を提案するとともに、この提案に基づき、繰り返し衝撃による損傷を制御するための包装設計手法を提案する必要がある。

1.2 理論の現状

1.2.1 損傷限界曲線（DBC）理論

ある物品に衝撃が加わった際に、その物品が損傷するのかどうかを見積るために、Newton[21]は損傷限界曲線（Damage Boundary Curve。以下、DBC）理論を提唱した。この理論を被包装物に照らした場合、任意の衝撃が 1 回印加された際に被包装物が損傷するか、しないかを衝撃パルス波形における高さと等価なピーク加速度（Peak Acceleration。以下、*PAcc*）およびその面積と等価な速度変化（Velocity Change。以下、*Vc*）（**Fig. 1-1**）の 2 要因により判定することができる（**Fig. 1-2**）。

落下試験を主とした被包装物への衝撃印加試験の結果から予め DBC を導出し、

損傷領域および非損傷領域を把握しておけば、実輸送中に想定される衝撃環境において被包装物が損傷するかしないか、あるいは被包装物に対して緩衝材を使用すべきかどうかといったことを容易に判断することができる。また、被包装物における部位ごとの強度の違い[22)]や減衰（ダンピング）の影響を考慮した DBC が提案されるなど[23)~25)]、この理論は実用的な発展を遂げている。さらに、農産分野においても、1 回の衝撃によるジャガイモの損傷発生を予測するための DBC が提示されている[26)]。しかし、従来の DBC 理論はあくまで被包装物もしくは物品が 1 回の衝撃により損傷するのかしないのかを判定するための理論であり、蓄積疲労により損傷する被包装物を対象としたものではない。このことは、工業製品の包装設計を対象とし、損傷限界曲線の導出方法を取り扱う JIS Z0119:2002、7.2.3 手順 f に、「損傷までの試験回数は、繰返し衝撃による蓄積疲労を避けるため多くとも 5～6 回が望ましい。」と記載されている[27)]ことからもわかる。

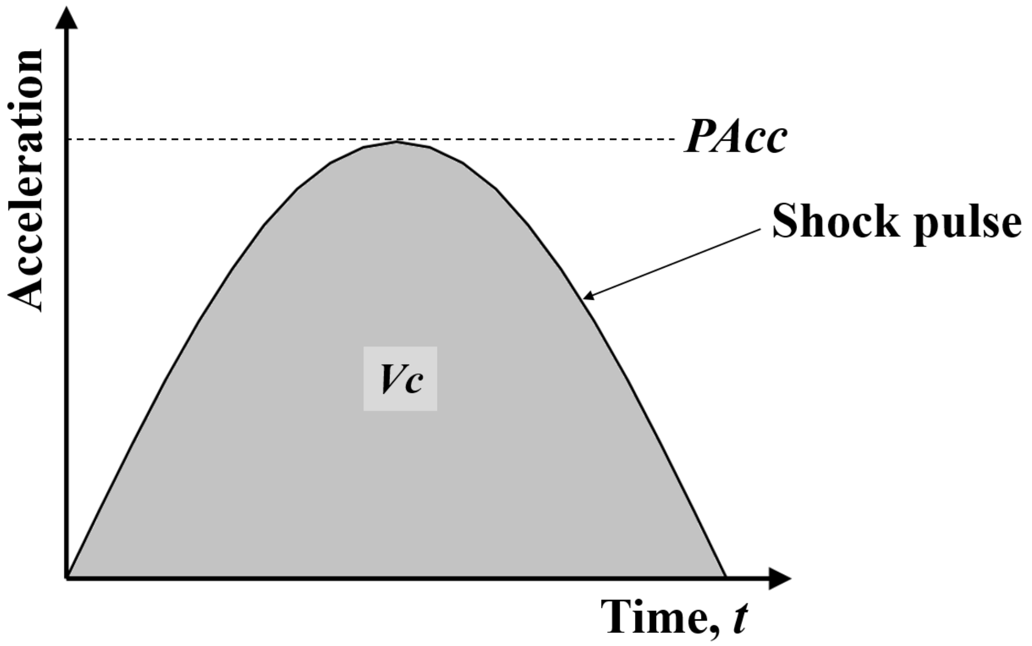

Fig. 1-1 Relationship between time (*t*), *PAcc* and *Vc* on shock pulse

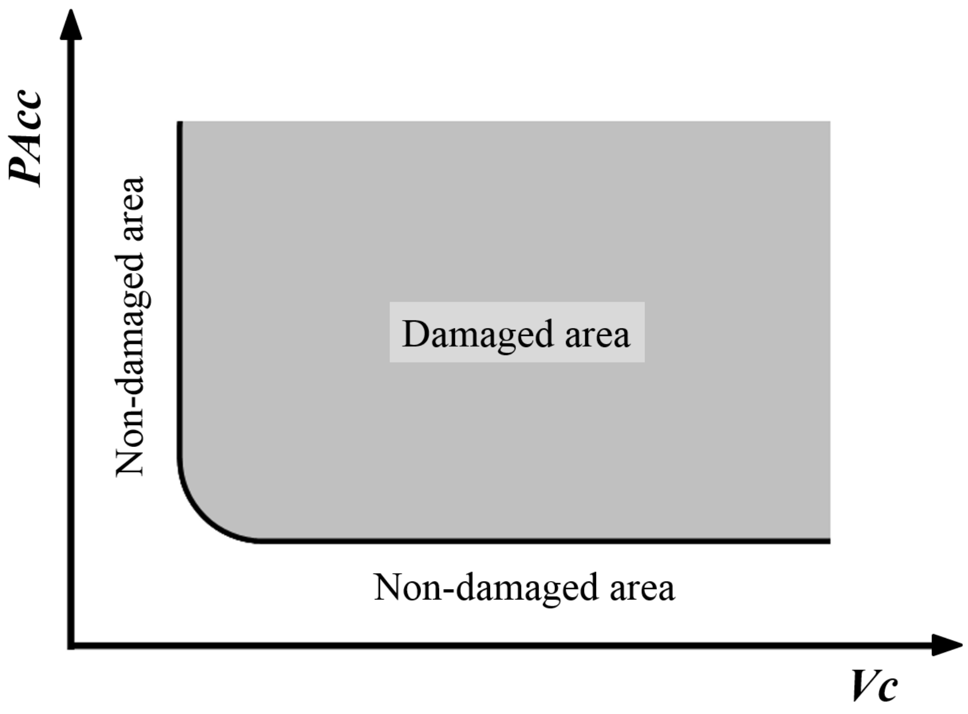

Fig. 1-2 DBC obtained as relationship between *Vc* and *PAcc*

1.2.2 S-N 曲線理論

物品の蓄積疲労による損傷が、Palmgren-Miner 則[28]に従い発生する場合、応力（以下、*S*）とその繰り返し回数（以下、*N*）との関係は、以下の式に示す累乗近似曲線として表すことができる。

$$N = aS^{-b} \qquad 式(1\text{-}1)$$

ここで、*a* および *b* は定数である。この関係は、Wöhler により見出され[29]、応力を示す‘Stress’（または、ひずみを示す‘Strain’）および繰り返し回数を示す‘Number’の頭文字を取って S-N 曲線理論と呼ばれる。この理論は、物品の蓄積疲労損傷の評価や再現に広く応用されている[9)~12),30),31)]。運動の第 2 法則より、物品に加速度が加わることと力が加わることは等価であるため、*PAcc* に起因する衝撃応力を *S* の発生要因と考えることができる。また、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の評価において、繰り返し応力の発生要因を繰り返し衝撃応力と置き換えることにより、S-N 曲線理論が応用可能であるものと考えられる（**Fig. 1-3**）。

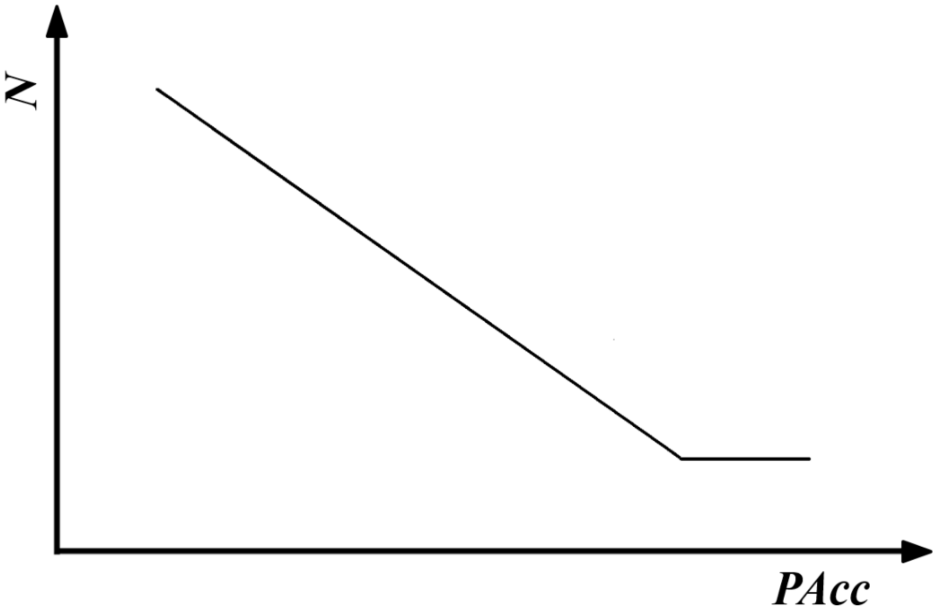

Fig. 1-3 Image of S–N curve showing relationship between *PAcc* and *N*

また、式（1-1）に示す関係が成立する場合において、*N* 回の応力により損傷する物品が、*n* 回の応力を受けた際の損傷度（以下、*D*）は、以下の式で表すことができる。

$$D = n／N \qquad \text{式(1-2)}$$

式（1-2）より、損傷が発生する際においては、$n = N$ であるため、$D = 1$ となる。

実輸送においては、緩衝材の有無も含め様々な包装形態が用いられている。また、衝撃の発生要因としては、人為的な落下[32)]や道路面の状況に起因するもの[33)]など様々な事象が想定される。**Fig. 1-1** より、衝撃作用時間（以下、*t*）、*PAcc* および *Vc* の関係は、以下の式（1-3）で表されることから、使用される緩衝材の違いや衝撃発生要因の違いにより、物品が衝撃を受けた際に発生する *PAcc* と *Vc* の組み合わせは様々に変化すると考えられる。

$$PAcc = dVc／dt \qquad \text{式(1-3)}$$

しかし、ここで式（1-1）および **Fig. 1-3** を再見すると *Vc* がパラメータに含ま

れておらず、この理論では *PAcc* と対となる *Vc* の影響が考慮できないことがわかる。**1.2.1** で示した DBC 理論において、*PAcc* が同一でも *Vc* が異なることにより被包装物の損傷領域および非損傷領域が変化することを考慮すれば、*Vc* の変化により *N* が変化することは容易に理解できる。

1.2.3　蓄積疲労を考慮した DBC 理論

前節まで、従来の DBC 理論は *Vc* の影響を考慮しているものの、*N* を考慮していないことを示し、従来の S-N 曲線理論は、*N* に影響を及ぼす *Vc* の違いを考慮していないことを述べた。

Burgess[34)]は、*Vc* の違いが *N* に及ぼす影響を考慮し、**Fig. 1-4** に示すような DBC を提示している。この例は、摩擦によるプラスチックの損傷評価を対象としており、衝撃による損傷を評価する上で必要となる *PAcc* の影響については想定していない。この点を踏まえ、Kipp[14)]は、*PAcc* の違いを考慮した DBC を提案している（**Fig. 1-5**）。このような DBC を繰り返し衝撃による被包装物の損傷評価に応用することにより、損傷対策における精度の向上が期待できる。しかし、被包装物の蓄積疲労損傷限界を *PAcc*、*Vc* および *N* の関係から定義し、緩衝包装を設計する検討は、これまでになされていない。

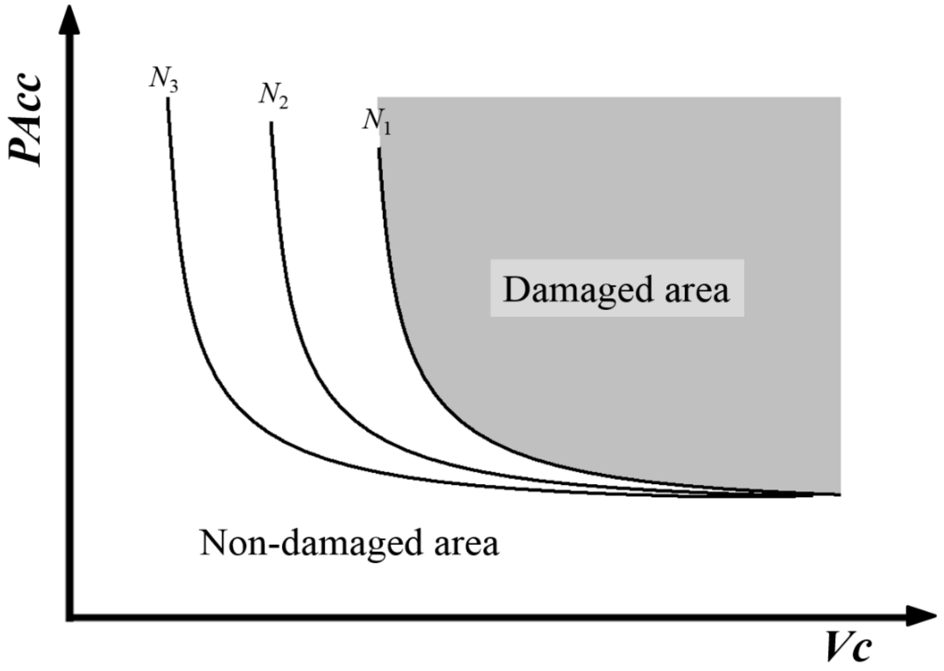

Fig. 1-4 Image of DBC considering cumulative fatigue based on figure presented by Burgess[34)]

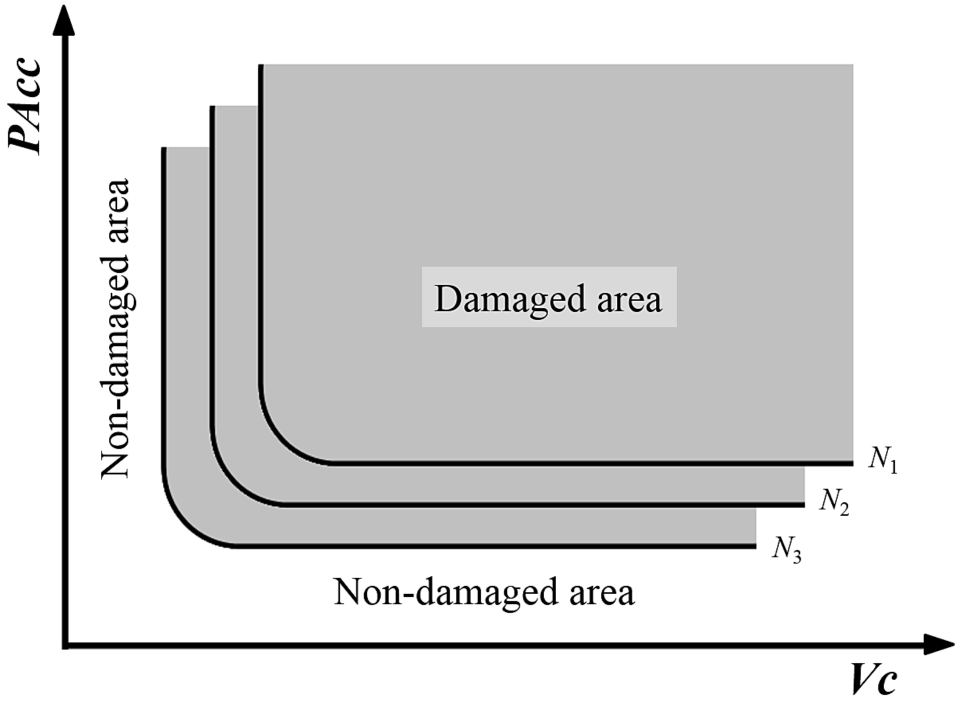

Fig. 1-5 Image of DBC considering *Vc*, *PAcc*, and cumulative fatigue based on figure presented by Kipp[14)]

1.3　本研究の目的および方針

前節までに述べた背景および理論の現状を踏まえ、本研究の目的および方針を以下の通り定める。

1) 繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価を、応用事例のない S-N 曲線理論を用いて行う。
2) 物品の蓄積疲労損傷の発生における *Vc* の影響を評価する。
3) 繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷の発生に及ぼす *PAcc* および *Vc* の影響を、実輸送を想定した包装条件下に在る被包装物を用いて評価する。
4) 3)の評価結果を踏まえた上で、*PAcc*、*Vc* および *N* の関連性を考慮した、緩衝包装方法を提案する。

1.4　本論文の構成

本論文を 7 つの章により構成する。まず、本章では本研究の目的を明確にするために、研究の必要性を裏付ける背景、関連する理論の現状およびその問題点を整理し、目的と方針を提示している。第 2 章では、**1.3** に対応し *PAcc* と *N* の関係をS-N曲線により表すことができること、およびこの曲線を用いることにより、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷を評価できることを検証するために、蓄積疲労により損傷するイチゴ果実を対象とした損傷評価を行う。第 3 章では、*N* に及ぼす *Vc* の影響を検証するために、イチゴ果実に繰り返し衝撃を印加した際における *PAcc* と対となる *Vc* の違いが *N* に及ぼす影響を調査する。第 4 章および第 5 章では、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の発生に及ぼす *PAcc* と *Vc* の組み合わせの影響を、実輸送で用いられる包装条件下で検証することとし、包装されたイチゴ果実を用いて繰り返し衝撃による損傷評価試験を行う。第 6 章では、実輸送に用いられる包装容器を用いて、*PAcc*、*Vc* および *N* の関連性を考慮した緩衝包装方法を提案する。最後に第 7 章において、本研究の結論を述べる。

なお、本論文は以下の有審査論文において発表した研究内容を整理したもので

ある。

・北澤裕明, 石川 豊, 路 飛, 胡 耀華, 中村宣貴, 椎名武夫: イチゴ輸送中の衝撃解析と損傷発生予測, 園芸学研究, **9**(2), 221–227 (2010).

・北澤裕明, 佐藤達雄, 長谷川奈緒子, 李 艶傑, 石川 豊: 蓄積疲労を考慮した青果物のための新たな損傷予測理論の構築（第 1 報）―繰り返し衝撃によるイチゴの損傷発生―, 日本包装学会誌一般論文, **21**(2), 125–132 (2012).

・Hiroaki Kitazawa, Katsuhiko Saito and Yutaka Ishikawa: Effect of Difference in Acceleration and Velocity Change on Product Damage Due to Repetitive Shock, Packaging Technology and Science, **27**(3), 221–230 (2014).

・北澤裕明, 斎藤勝彦: 蓄積疲労を考慮した青果物のための新たな損傷予測理論の構築（第 2 報）―多段積み包装されたイチゴ果実の損傷発生に及ぼす繰り返し衝撃の影響―, 日本包装学会誌一般論文, **23**(4), 277–285 (2014).

・Hiroaki Kitazawa, Katsuhiko Saito and Yutaka Ishikawa: Method for Controlling Damage to Products Subjected to Cumulative Fatigue Considering Damage Degree at Each Layer in Stacked Packaging, 日本包装学会誌一般論文, **24**(2), 69–78 (2015).

また、同様の内容を以下の国際会議および国内会議において発表している。

（国際会議）

・Hiroaki Kitazawa, Yutaka Ishikawa and Katsuhiko Saito: Shock Analysis during Fruits Export from Japan to Neighbouring Regions, The 19th IAPRI World Conference on Packaging 2014, International Association of Packaging Research Institutes, Victoria University, Melbourne, Australia, 2014 年 6 月 18 日, アブストラクト審査および全文形式論文有り, 口頭発表.

・Hiroaki Kitazawa: Trends in functional and bio-sourced packaging in Japan, The 43rd UJNR Food and Agriculture Panel Meeting, US Department of Agriculture and National Food Research Institute, Hotel Indigo, Georgia, U.S.A., 2014 年 10 月 21 日, 招待講演.

・Hiroaki Kitazawa, Yutaka Ishikawa and Katsuhiko Saito: Damage Control Method for Stacked Packaging, The 27th IAPRI Symposium on Packaging 2015, International Association of Packaging Research Institutes, Bancaja

Cultural Centre, Valencia, Spain, 2015 年 6 月 9 日, アブストラクト審査および全文形式論文有り, 口頭発表.

（国内会議）

・北澤裕明: 振動・衝撃によるイチゴ・オウトウの損傷を大幅に軽減できる包装技術, 2013 年度 第 1 回農研機構産学官連携交流セミナー「輸出を視野に入れた農産物の流通・鮮度保持技術」, 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構, 日本教育会館, 東京都千代田区, 2013 年 5 月 24 日, 招待講演.

・北澤裕明, 斎藤勝彦, 石川 豊: 衝撃加速度と速度変化の違いが繰り返し衝撃によるイチゴの損傷発生に及ぼす影響, 日本包装学会第 22 回年次大会研究発表会, 日本包装学会, 東京大学, 東京都文京区, 2013 年 7 月 9 日, アブストラクト審査無し, ポスター発表.

・北澤裕明, 中村宣貴, 石川 豊, 椎名武夫: 野菜や果物の「おいしい」を届けるために ―青果物の品質変化や損傷発生を予測する―, 2014 国際食品工業展アカデミックプラザ, 公益財団法人日本食品機会工業会, 東京国際展示場, 東京都江東区, 2014 年 6 月 10 日～13 日, アブストラクト審査有り, ポスター発表.

・北澤裕明: 包装技術による青果物の品質保持 ―鮮度保持および損傷防止対策の現状と今後の展開―, 食品技術研究会（食品の鮮度保持および加工に関する技術）第 3 回研究会, 公益財団法人わかやま産業振興財団, 和歌山商工会議所, 和歌山県和歌山市, 2015 年 1 月 22 日, 招待講演.

・北澤裕明: 青果物の品質を守るための包装技術と輸送環境計測, 第 119 回輸送包装懇話会, 公益社団法人日本包装技術協会, 東京都中央区, 2015 年 3 月 13 日, 招待講演.

参考文献

1) 川口和晃, 黒田知寛: 中国深セン地区の輸送振動調査, 日本包装学会誌, **16**(4), 283-287 (2007).

2) 独立行政法人 日本貿易振興機構: 2012 年度主要国・地域における流通構造調査, イチゴ編, (2013).

3) Kitazawa, H., Saito, K. and Ishikawa, Y.: Shock Analysis during Fruits

Export from Japan to Neighbouring Regions, Proceedings of the 19th IAPRI World Conference on Packaging, 195–202 (2014).

4) 渡部大輔，三明亮介，百田大輔，松井 一：メコン地域の陸路輸送における輸送環境の評価に関する研究，日本物流学会誌，(21)，183–190 (2013).

5) Cinar, Y. and Jang, G.: Fatigue life estimation of FBGA memory device under vibration, Journal of Mechanical Science and Technology, **28**(1), 107–114 (2014).

6) Scalia, G. L., Aiello, G., Miceli, A., Nasca, A., Alfonzo, G. and Settanni, L. Effect of Vibration on the Quality of Strawberry Fruits Caused by Simulated Transport, Journal of Food Process Engineering, **Online**(doi: 10.1111/jfpe.12207) (2015).

7) 津田和城，中嶋隆勝，斎藤勝彦：ガタ振動をともなう包装品の振動耐久性に関する検討，日本航海学会論文集，(117)，111–117 (2007).

8) 細山 亮，中嶋隆勝：尖度を考慮した非ガウス型ランダム振動生成法，日本包装学会誌，**20**(1)，27–34 (2011).

9) 岩元睦夫，河野澄夫，早川 昭：青果物輸送の等価再現化に関する研究（第 1 報）―多段積載時の段ボール箱および内容レタスの振動特性ならびに損傷性―，農業機械学会誌，**39**(3)，343–349 (1977).

10) 岩元睦夫，河野澄夫，早川 昭：青果物輸送の等価再現化に関する研究（第 2 報）―損傷度の定義と輸送シミュレーション時の加速度レベルの設計―，農業機械学会誌，**40**(1)，61–67 (1978).

11) 岩元睦夫，河野澄夫，早川 昭：青果物輸送の等価再現化に関する研究（第 3 報）―損傷に影響する振動衝撃加速度パワースペクトルの評価―，農業機械学会誌，**42**(3)，369–374 (1980).

12) 中村宣貴，梅原仁美，岡留博司，中野浩平，前澤重禮，椎名武夫：振動周波数および振動方向がイチゴ果実の損傷に及ぼす影響，農業施設，**38**(2)：101–108 (2007).

13) 臼田浩幸，椎名武夫，石川 豊，佐竹隆顕：青果物の損傷性を考慮したランダム振動試験法の開発，農業施設，**37**(1)，3–9 (2006).

14) Kipp, W. I.: Developments in Testing Products for Distribution, Packaging Technology and Science, **13**(3), 89–98 (2000).

15) Crisosto, C. H., Johnson, R. S., Luza, J. and Day, K.: Incidence of Physical Damage on Peach and Nectarine Skin Discoloration Development: Anatomical Studies, Journal of the American Society for Horticultural Science, **118**(6), 796–800 (1993).

16) Maness, N. O., Brusewitz, G. H., Chrz, D. and Taylor, G. G.: Performance of an Instrument Designed for, and Evaluation of Methods to Assess, Peach Fruit Impact Bruise Susceptibility, Journal of Food Quality, **18**(4), 335–353 (1995).

17) Bollen, A. F., Nguyen, H. X., and Rue, B. T. D.: Comparison of Methods for Estimating the Bruise Volume of Apples, Journal of Agricultural Engineering Research, **74**(4), 325–330 (1999).

18) Lu, F., Ishikawa, Y., Kitazawa, H. and Satake, T.: Measurement of impact pressure and bruising of apple fruit using pressure-sensitive film technique, Journal of Food Engineering, **96**(4), 614–620 (2010).

19) 池田裕朗, 石川　豊, 北澤裕明, 路　飛, 赤阪信二, 塩田　俊: 収穫から選果までの間にレモン果実が受ける衝撃解析, 園芸学研究, **9**(1), 107–112 (2010).

20) 池田裕朗, 石川　豊, 赤阪信二, 塩田　俊, 北澤裕明, 路　飛: 収穫後の衝撃がレモン果実貯蔵中の腐敗の発生に及ぼす影響, 園芸学研究, **10**(1), 93–100 (2011).

21) Newton, R. E.: Fragility Assessment –Theory and Test Procedure–, U.S. Naval Post Graduate School. Now available from Lansmont Corporation, 17 Mandecille Ce., Monterey, CA 93940 U.S.A., www.lansmont.com (1968).

22) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 寺岸義春: 新しい製品衝撃強さ評価試験方法の提案, 日本機会学会論文集（C 編）, **67**(664), 3924–3929 (2001).

23) Wang, Z.-W., and Hu, C.-Y.: Shock Spectra and Damage Boundary Curves for Non-Linear Package Cushioning Systems, Packaging Technology and Science, **12**(5), 207–217 (1999).

24) Wang, Z.-W.: Shock Spectra and Damage Boundary Curves for Hyperbolic Tangent Cushioning System and their Important Features, Packaging Technology and Science, **14**(4), 149–157 (2001).

25) Wang, Z.-W.: On Evaluation of Product Dropping Damage, Packaging

Technology and Science, **15**(3), 115–120 (2002).

26) Mathew, R. and Hyde, G. M.: Potato Impact Damage Thresholds, Transactions of the ASABE, **40**(3), 705–709 (1997).

27) JIS Z0119:2002: 包装及び製品設計のための製品衝撃強さ試験方法, (2002).

28) 日本材料学会編: 金属材料強度試験便覧, 養賢堂, 東京, pp.31–38 (1977).

29) Wöhler, A.: Ueber die Festigkeits–Versuche mit Eisen und Stahl, Zeitschrift für Bauwesen, **20**, 73–106 (1870).

30) 中嶋隆勝, 津田和城, 川田浩二, 山内佳門: 蓄積疲労評価型振動試験システムの提案, 日本包装学会誌, **16**(1), 41–51 (2007).

31) 野中 勇: 総説：高温機器の長期疲労、クリープおよびクリープ疲労寿命予測の現状と課題, 材料, **64**(2), 65–73 (2015).

32) Singh, S. P., Burgess, G. and Singh, J.: Measurement and Analysis of the Second-day Air Small and Light-weight Package Shipping Environment within Federal Express, Packaging Technology and Science, **17**(3), 119–127 (2004).

33) Lu, F., Ishikawa, Y., Shiina, T., and Satake, T.: Analysis of Shock and Vibration in Truck Transport in Japan, Packaging Technology and Science, **21**(8), 479–489 (2008).

34) Burgess, G. J.: Product Fragility and Damage Boundary Theory, Packaging Technology and Science, **1**(1), 5–10 (1988).

第２章　S-N 曲線理論の応用による被包装物の蓄積疲労損傷評価

2.1　緒　言

第 1 章では、物品の蓄積疲労損傷を評価するための理論の 1 つに S-N 曲線理論があり、これまで、この理論を応用した繰り返し応力や振動による材料および物品の損傷評価が行われてきたこと [1)~4)] を述べた。この理論における *S* を *PAcc* と置き換えることにより、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価を実施できる可能性が考えられる。しかし、この点に関して検証した事例はない。本章では S-N 曲線を用いた被包装物の蓄積疲労損傷評価の妥当性を検証した。

2.2　実　験

2.2.1　試　料

試料は蓄積疲労により損傷することが明らかとなっている [3),4)] イチゴ果実とした。果実は、2009 年 12 月～2010 年 2 月の間に茨城県内で生産され、2 日以内に収穫された品種‘とちおとめ’（等級 2 L）を対象とした。あらかじめ目視による選抜を行い、傷や腐敗が発生しているものや奇形果を除去した。さらに、その中から着色程度 90%以上の果実のみを選抜し、試験に供した。このような選抜を経た果実の、硬度計（KM-1、藤原製作所）により測定した平均果肉硬度（円筒形プランジャー（5 mm 径）貫通時の最大抵抗力）は、5.6 N ± 0.6（標準偏差）であった。15 個の果実をポリエチレンテレフタレート（以下、PET）樹脂製トレー（外寸 115 mm × 170 mm × 50 mm）に 2 段に重ねて（上段：3 個 × 3 列、下段：2 個 × 3 列）収納した。

2.2.2　包装形態

国内輸送において一般的に使用されている包装形態を用いた。すなわち果実を収納したトレーを段ボール箱（JIS Z1507、0425）[5)] に 4 個ずつ梱包し、さらにそ

の段ボール箱を 5 個積み重ねてポリプロピレン製バンドで結束したものである。包装の総重量は約 6.0 kg であった。

2.2.3 落下試験およびピーク加速度（*PAcc*）の計測条件

本章では、*h* を *PAcc* に変換するために、果実を用いずに、以下に示すダミーサンプルを用いた落下試験を行った。**2.2.2** で示したトレー内底面中央部に衝撃計側解析システム（SMH-12、神栄テクノジー）に接続された 3 次元加速度センサー（2366W、昭和測器。寸法 8.0 mm × 7.0 mm × 5.5 mm、重量 1.2 g）を両面テープで貼り付け（**Fig. 2-1A**）、その上から粘土を詰めて固定した（**Fig. 2-1B**）。これを **2.2.2** の包装条件により梱包した。Ishikawa ら[6]は、オウトウ果実を本章と類似の包装形態で輸送した際の衝撃解析を行い、h = 0.20 m の落下に相当する衝撃の発生を報告している。彼らの報告を踏まえて本研究では、h = 0.20 m を中心とした、0.05 m、0.10 m、0.15 m、0.20 m、0.25 m、0.30 m および 0.35 m の h を設定し、試験（落下衝突面は鋼鉄板）を行った。h = 0.05 m～0.15 m の間では、手動で落下させたが、h = 0.20 m 以上では包装容器を手動で垂直に落下させることが困難であったため、落下試験機（DTS-50、神栄テクノロジー）を用いた。衝撃の解析対象は、1 段目（最下段）のみとした。各箱内の残りのスペースには粘土のみを詰めたトレーを配置した。供試試料である果実を詰めたトレー1 枚あたりの重量は 300 g～320 g の範囲にあったため、いずれのパックも重量が 320 g となるように調整した。計測された衝撃加速度を衝撃･振動解析ソフトウェア（SMS-500、神栄テクノロジー）に入力し、3 次元方向の衝撃加速度を合成することによりトレーに生じた *PAcc* を算出した。試験は落下条件ごとに 4 回行い、これを反復とした。

2.2.4 試料の損傷評価

本検証においては、ISO 4180-1 付属書[7]に記載された損傷の数値化方法を参考に、果実を繰り返し落下させた際におけるオセ（圧迫）傷、変形および果汁滲出の発生状況（**Fig. 2-2**）を以下の評点により数値化し、評価した。

傷なし :	0 点
オセ痕あり :	1 点

水浸状のスポットや変形を伴うオセ傷あり：　4点

果汁の滲出をともなう著しい変形あり：　　7点

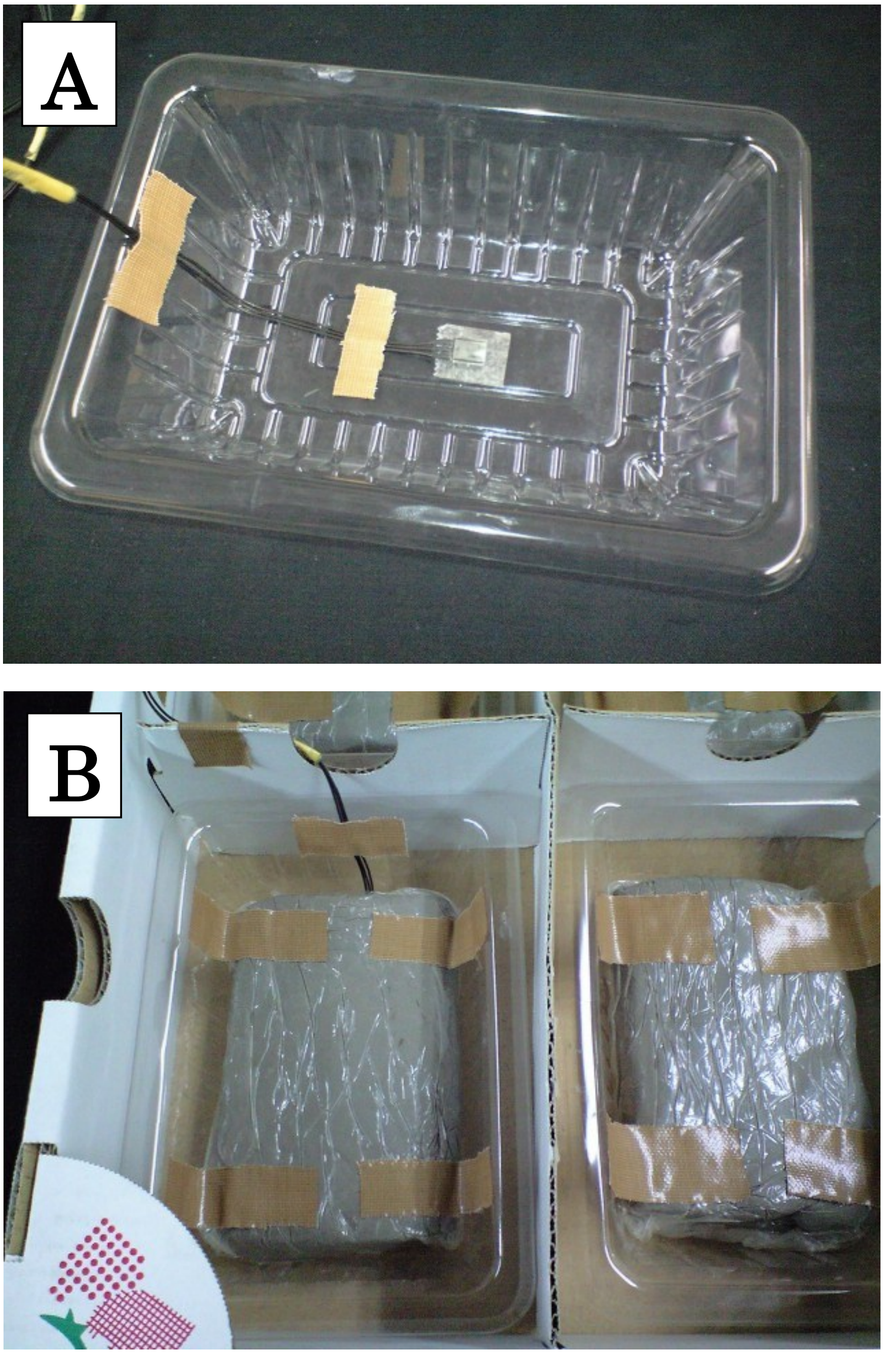

Fig. 2-1 Fixing of accelerometer

A: Attached to bottom centre of tray using double-sided adhesive tape

B: Kept in place by weight of clay

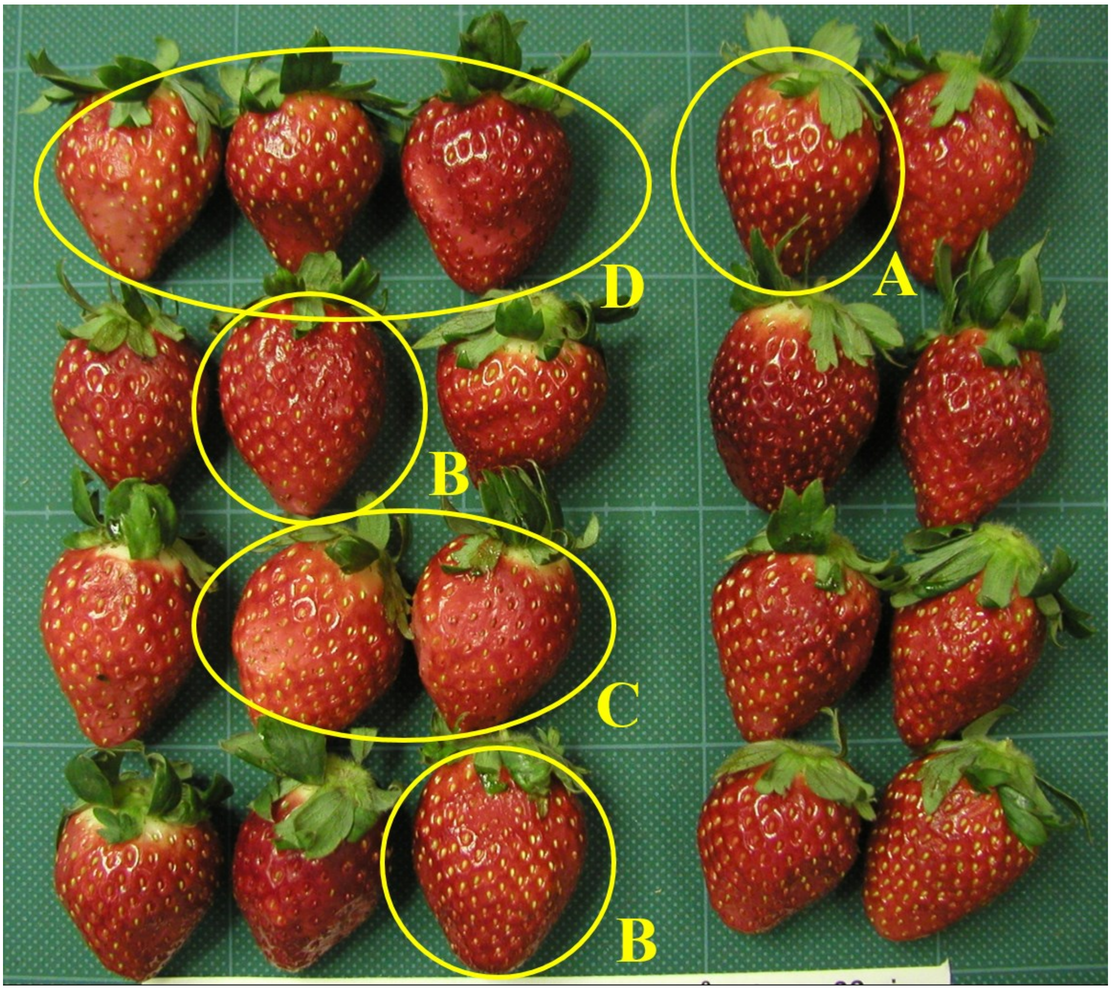

Fig. 2-2 Example of fruit damage

A: No damage

B: Damaged fruit with pressured spots

C: Damaged fruit with pressured and water-soaked spots

D: Damaged fruit with pressured and water-soaked spots, and exudate

包装形態は **2.2.2** に準じ、トレー下段に収納した 6 個の果実を損傷評価の対象とした。**2.2.3** の結果より、任意の *PAcc* を繰り返し印加した際のトレー下段に収納した全果実の評点を平均化し、1 個あたりの評点が市販品の平均値である 2.9（予め 6 個 × 30 トレーについて調査を行い算出）を上回った際に損傷発生と判定した。反復数は 3 とした。

2.2.5 目視による損傷評価の妥当性

イチゴ果実に振動を与えた際における見かけの損傷程度は、振動加速度あるいは加振時間の違いにより変化することが知られている[8)]。Jiang ら[9)]は、見かけの損傷程度と損傷部位からの果汁の滲出量の対応に着目し、振動により損傷させた果実を一定時間蒸留水に浸漬・除去した後、果汁を含む蒸留水の電気伝導度を測定することにより、目視により判断した損傷程度を電気伝導度の値に換算できることを実証した。このことを踏まえ、本研究においては目視による果実の損傷評価を定量可能な評価手法であるものと仮定し用いた。

2.3 実験結果

2.3.1 落下高（*h*）と *PAcc* の関係

h を 0.05 m、0.10 m、0.15 m、0.20 m、0.25 m、0.30 m および 0.35 m とした際における、1 段目の箱内のトレーに発生した *PAcc* は、それぞれ 469.0 m s^{-2}、814.9 m s^{-2}、916.4 m s^{-2}、1143.9 m s^{-2}、1515.6 m s^{-2}、1889.7 m s^{-2} および 2159.2 m s^{-2} となり（**Fig. 2-3** および **Fig. 2-4**）、*h* と *PAcc* との関係は、高い決定係数（この場合、*PAcc* の *h* に対する寄与率を示す）をともなう以下の式で表すことができた。

$$PAcc = 4431.2h^{0.7644} \ (R^2 = 0.9708) \qquad 式(2\text{-}1)$$

このことから、本章においては *h* は *PAcc* に変換可能であるものと判断し、これを前提とした上で、以下の損傷評価を実施した。

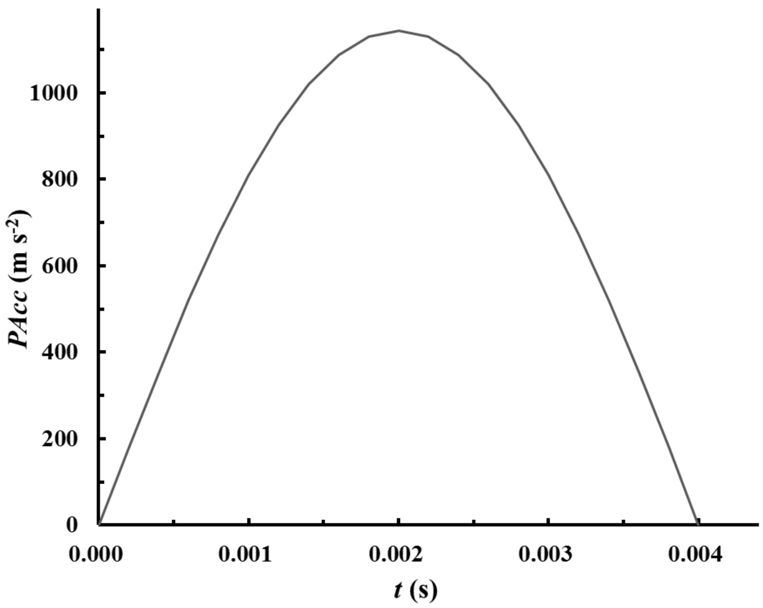

Fig. 2-3 Shock pulse with dropping from 0.20 m

The *PAcc* and *Vc* values are 1143.9 m s^{-2} and 2.90 m s^{-1}, respectively.

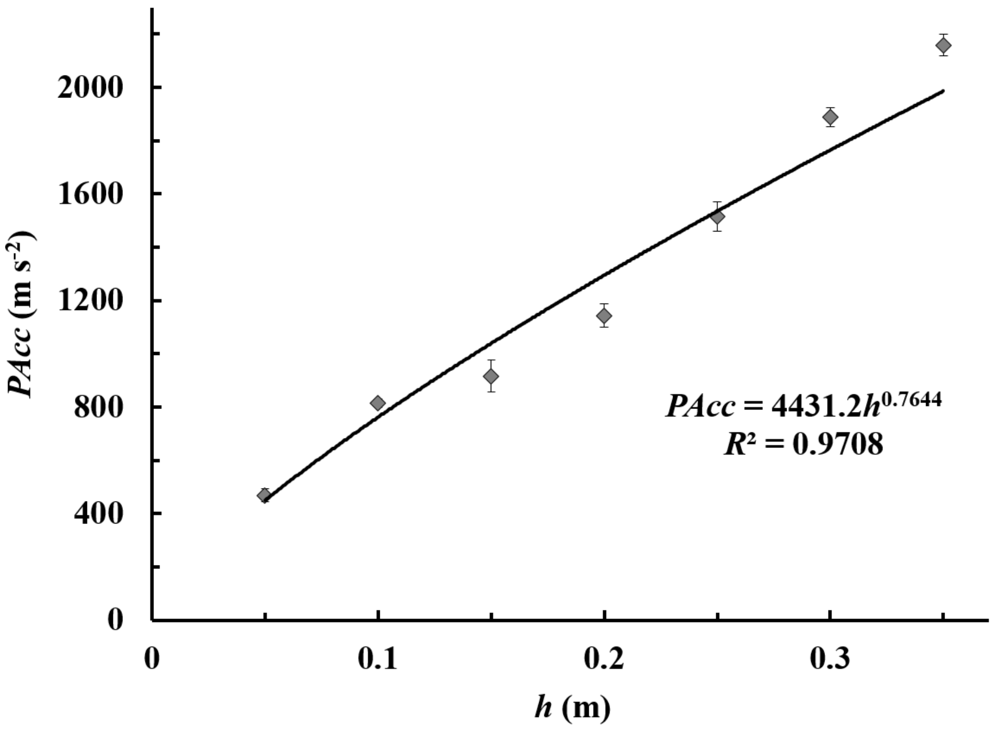

Fig. 2-4 Relationship between *h* and *PAcc*

Error bars show standard error (SE) of four replicates.

2.3.2 *PAcc* および衝撃繰り返し回数（*N*）の関係

2.3.1 の結果を踏まえ、448.2 m s^{-2}、592.3 m s^{-2}、799.2 m s^{-2} および 1144.4 m s^{-2} の *PAcc* を果実に印加した際における損傷発生までの *N* の平均値を調査したところ、それぞれ 4.0 回、3.3 回、1.7 回および 1.3 回となった（**Fig. 2-5**）。また、これらの関係は高い決定係数をともなう以下の式で表すことができ、*PAcc* と *N* の関係を第 1 章・式（1-1）で示した S-N 曲線として表すことが可能であることが確認できた。

$$N = 7559.2 PAcc^{-1.226} \quad (R^2 = 0.9793) \qquad 式(2\text{-}2)$$

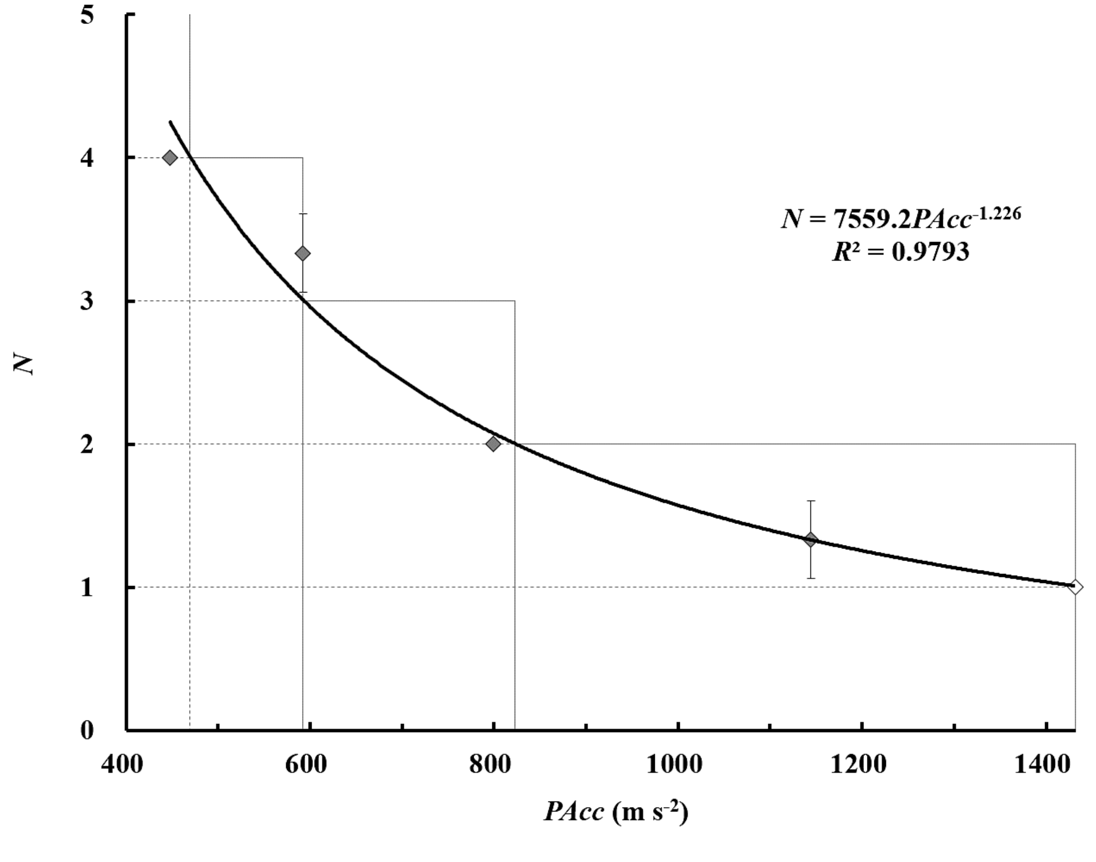

Fig. 2-5 Relationship between *PAcc* and *N*

Error bars show SE of three replicates.

◇shows the predicted value.

2.3.3　*PAcc* と *N* の関係式の妥当性検証

式（2-2）の妥当性を検証するために、1 回の衝撃で果実が損傷すると推定される *h* からの落下試験を行い、実際に果実に損傷がみられるかどうかの確認を行った。

式（2-2）で示す *PAcc* と *N* との関係から、果実に 1431.9 m s^{-2} 以上の衝撃が 1 回印加された場合、損傷するものと推定される（**Fig. 2-5**）。また、式（2-1）に示す *h* と *PAcc* の関係式から、この *PAcc* が生じる *h* は、0.228 m となる。これらの点を踏まえ、*h* = 0.234 m から果実を落下させたところ、1 回の衝撃印加により果実が損傷することを確認できた（**Table 2-1**）。この結果から、式（2-2）で示した *PAcc* および *N* の関係は妥当であると判断できた。

Table 2-1
Confirmation of the relationship between *PAcc* and *N*

h (m)		*PAcc* (m s^{-2})	*N*
0.234	Predicted	1460.1^{z}	1.0^{y}
	Actual	1414.1 ± 52.0^{x}	1.0 ± 0.0^{x}

^{z}Calculated by Equation (2-1)
^{y}Calculated by Equation (2-2)
^{x}Average ± SE (n = 3)

2.4　結　言

以上より、*PAcc* と *N* の関係を S-N 曲線により表すことができること、およびこの曲線を用いることにより、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷を高い精度で評価できることを実証した。

しかし、本章においては、*N* に及ぼす *Vc* の影響を考慮していない。また、損傷評価の対象は多段積み包装における 1 段目に収納された果実のみに限定した。従って、*Vc* および多段積み包装における段（部位）の違いが *N* に及ぼす影響については、さらなる検証が必要であると考えられ、次章以降において議論する。

参考文献

1) 野中 勇: 総説 : 高温機器の長期疲労、クリープおよびクリープ疲労寿命予測の現状と課題, 材料, **64**(2), 65–73 (2015).

2) 津田和城, 中嶋隆勝, 斎藤勝彦: ガタ振動をともなう包装品の振動耐久性に関する検討, 日本航海学会論文集, (117), 111–117 (2007).

3) 岩元睦夫, 河野澄夫, 早川 昭: 青果物輸送の等価再現化に関する研究（第 3 報）—損傷に影響する振動衝撃加速度パワースペクトルの評価—, 農業機械学会誌, **42**(3), 369–374 (1980).

4) 中村宣貴, 梅原仁美, 岡留博司, 中野浩平, 前澤重禮, 椎名武夫: 振動周波数および振動方向がイチゴ果実の損傷に及ぼす影響, 農業施設, **38**(2): 101–108 (2007).

5) JIS Z1507:2013: 段ボール箱の形式, (2013).

6) Ishikawa, Y., Kitazawa, H. and Shiina, T.: Vibration and Shock Analysis of Fruit and Vegetables Transport —Cherry Transport from Yamagata to Taipei—, Japan Agricultural Research Quarterly, **43**(2) 129–135 (2009).

7) ISO 4180-1: Complete, Filled Transport Packages –General Rules for the Compilation Performance Test Schedules– Part 1. General Principles: appendix (1980).

8) 北澤裕明, 石川 豊, 中村宣貴, 椎名武夫: イチゴ輸送中の損傷を防止する新たな包装形態, 日本食品保蔵科学会誌, **34**(1): 19–23 (2008).

9) Jiang, Y., Shiina, T., Nakamura, N. and Nakahara, A.: Electrical Conductivity Evaluation of Postharvest Strawberry Damage, Journal of Food Science, **66**(9), 1392–1395 (2001).

第３章　繰り返し衝撃による物品の損傷発生における速度変化（*Vc*）の影響評価

3.1　緒　言

第２章において、S-N 曲線理論を応用し被包装物の蓄積疲労損傷評価を行った。一方、第１章において、実輸送における包装条件および衝撃の発生要因は様々であり、被包装物が衝撃を受けた際に発生する *PAcc* と *Vc* の組み合わせは多様であると想定されることを述べた。DBC 理論[1)]において、*PAcc* が同一でも *Vc* が異なることにより被包装物の損傷領域および非損傷領域が変化することを考慮すれば、*Vc* の違いが *N* に影響する可能性が考えられる。しかし、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の発生において、この点に関して検証した事例はない。

そこで本章では、物品に繰り返し衝撃を印加した際における *PAcc* と対となる *Vc* の違いが *N* に及ぼす影響を検証した。

3.2　実　験

3.2.1　試　料

第２章・**2.2.1** で述べた根拠に基づき、茨城県内で生産され 2010 年１月～2 月に収穫されたイチゴ‘とちおとめ’果実を用いた。第２章と同様の方法により測定した果実の果肉硬度は、約 6.1 N であった。傷および変形があるものは除外し、着色程度 80%～100%の果実を選抜した。選抜した果実は、PET 樹脂製のトレー内に 2 段に重ねて収納した。この例を **Fig. 3-1** に示す。収納した果実の数は 20 個（上段：3 個 ×４列、下段：2 個 ×４列）とした。

3.2.2　衝撃条件の作成

果実を収納したトレーを２枚のアルミ板で固定し、**Fig. 3-2** に示す装置を用いて落下させた。その際、*h* および落下面に配置する緩衝材の物性を変えることにより、種々の *PAcc* および *Vc* の組み合わせ条件を作成した。供試した緩衝材の材

質および物性値を **Table 3-1** に示す。緩衝材の厚さはいずれも 10 mm とした。トレー下側におけるアルミ板の外側底面と落下面との間を h とし、h = 0.01 m、0.02 m、0.04 m、0.08 m および 0.12 m となる落下条件について検討した。その際、3 次元加速度センサー（2366W、昭和測器）をトレー内底面に両面テープで張り付け、*PAcc* および *Vc* を計測した。計測は落下条件ごとに 14 回～15 回行った。計測したデータは振動・衝撃解析デバイス（SMH-12、神栄テクノロジー）により収集し、振動衝撃解析ソフトウェア（SMS-500、神栄テクノロジー）を用いて解析した。この解析結果に基づき、**Table 3-2** に示す 1 と 7、5 と 6 と 9 のように *PAcc* は近い値であるが *Vc* の値が離れた組み合わせ、または、その逆に 1 と 2、3 と 6、7 と 9 および 8 と 11 のように *PAcc* の値は離れているが、*Vc* の値は近いといった組み合わせを中心に 11 条件を抽出し、以下に述べる損傷評価試験に供した。

Fig. 3-1 Example of strawberries in two-layer packaging

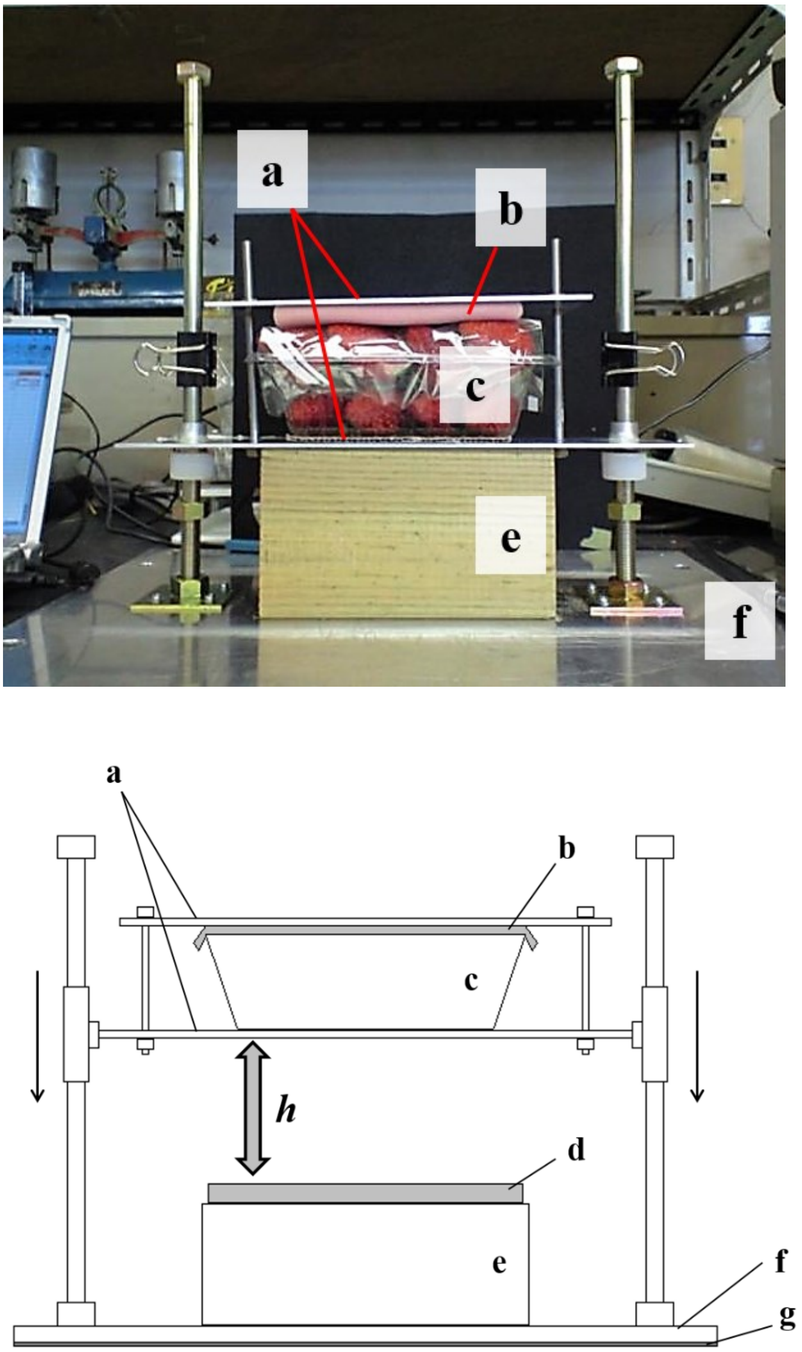

Fig. 3-2 Drop test system for strawberry damage estimation: (**a**) aluminium plates, (**b**) urethane foam to avoid rebound, (**c**) package containing strawberries, (**d**) cushioning material for counter face, (**e**) wood block, (**f**) aluminium plate, and (**g**) rubber sheet

h: drop height

Arrows indicate the drop direction.

Table 3-1
Properties of cushioning materials used for the drop test system shown in **Fig. 3-2**

Cushion	Base material	Density ($kg\ m^{-3}$)	Compressive stress at 25% strain (kPa)
A	Polyurethane	28.3 ± 1.0[z]	1.5 ± 0.0[y]
B	Polyurethane	8.0 ± 0.3	1.4 ± 0.0
C	Polyurethane	26.4 ± 0.9	4.0 ± 0.5
D	Polyurethane	27.1 ± 0.5	3.8 ± 0.6
E	Polychloroprene	80.9 ± 1.7	5.7 ± 0.3
F	Polyurethane	49.7 ± 1.8	32.9 ± 0.0
G	Polyethylene	65.3 ± 1.5	92.6 ± 5.2
H	Polychloroprene	101.1 ± 0.8	25.2 ± 2.9

[z]Average ± Standard deviation (SD; n = 5)
[y]Average ± SD (n = 3)

Table 3-2
Selected counterface conditions for drop tests

Test No.	Counterface Cushion	h (m)	$PAcc$ ($m\ s^{-2}$)	Vc ($m\ s^{-1}$)
1	A	0.01	117.4[z]	0.70[z]
2	B	0.01	62.0	0.72
3	B	0.04	97.0	1.41
4	B	0.08	145.3	1.82
5	B	0.12	197.2	2.08
6	C	0.04	216.8	1.42
7	D	0.02	122.8	1.05
8	E	0.08	351.5	1.74
9	F	0.02	204.0	0.91
10	G	0.04	283.0	1.23
11	H	0.08	512.0	1.71

[z]Obtained from 14–15 replications

3.2.3　試料の損傷評価

果実を収納したトレーを **Table 3-2** に示す 11 の条件下において繰り返し落下させ、*N* を調査した。第 2 章・**2.2.5** を根拠とし、目視による損傷評価を行い、トレー中 85%（17 個）の果実に、圧迫による変形または擦れ傷が発生した際に損傷が発生したと判定した。

第 1 章・**1.2.2** より、*N* 回の衝撃により果実が損傷する場合、果実における衝撃 1 回あたりの損傷度（以下、*d*）は、以下の式で表すことができる。

$$d = 1／N \qquad \text{式(3-1)}$$

式（3-1）を用いて各条件に対応する *d* を算出した。試験は落下条件ごとに 3 回行い、これを反復とした。

3.3　実験結果および考察

Table 3-2 に示す各落下条件により、果実を落下させた際の損傷発生までの *N* の平均値は、1～11 まで順に、18.7 回、20.7 回、10.0 回、9.0 回、7.0 回、9.0 回、11.5 回、7.0 回、10.3 回、8.3 回および 8.0 回であった。式（3-1）より算出される *d* は、それぞれ 0.05、0.05、0.10、0.11、0.14、0.11、0.09、0.14、0.10、0.12 および 0.13 となる。これを、*Vc* を横軸、*PAcc* を縦軸としプロットしたものを **Fig. 3-3** に示す。

1 と 2 とを比較すると、*Vc* は、それぞれ 0.70 m s^{-1} および 0.72 m s^{-1} であり、ほぼ同等であるが、*PAcc* は、それぞれ 117.4 m s^{-2} および 62.0 m s^{-2} であり 2 倍近くの差がある。しかし、いずれも d = 0.05 となり、この 2 点の比較において、*PAcc* は *d* にほとんど影響していない。8 と 11 との比較においても同様の傾向がうかがえる。また、5 と 9 の *PAcc* の比較において、前者は、197.2 m s^{-2}、後者は 204.0 m s^{-2} と、ほぼ変わらないにも関わらず、*Vc* に 2 倍以上の差があることにより、両者の *d* には 1.4 倍の差が現れている。この結果においても *PAcc* よりも *Vc* の違いが *d* に大きく影響している。

一方、3 と 10 あるいは 4 と 8 または 11 の比較においては、*d* は *Vc* よりも *PAcc* の違いに影響された傾向があり、*d* が *PAcc* と *Vc* の組み合わせにより、様々に変

化することが確認できた。

なお、本章の落下衝撃試験における衝撃パルスは正弦半波に近かったことから、落下試験に供する *Vc* の範囲を拡大した場合、各 *d* に対応する *PAcc* 側の限界は、第 1 章・**Fig. 1-2** および **Fig. 1-5** で示したような直線とはならず、**Fig. 3-4** に示す様に右肩上がりの波線 [2),3)] になるものと推定された。

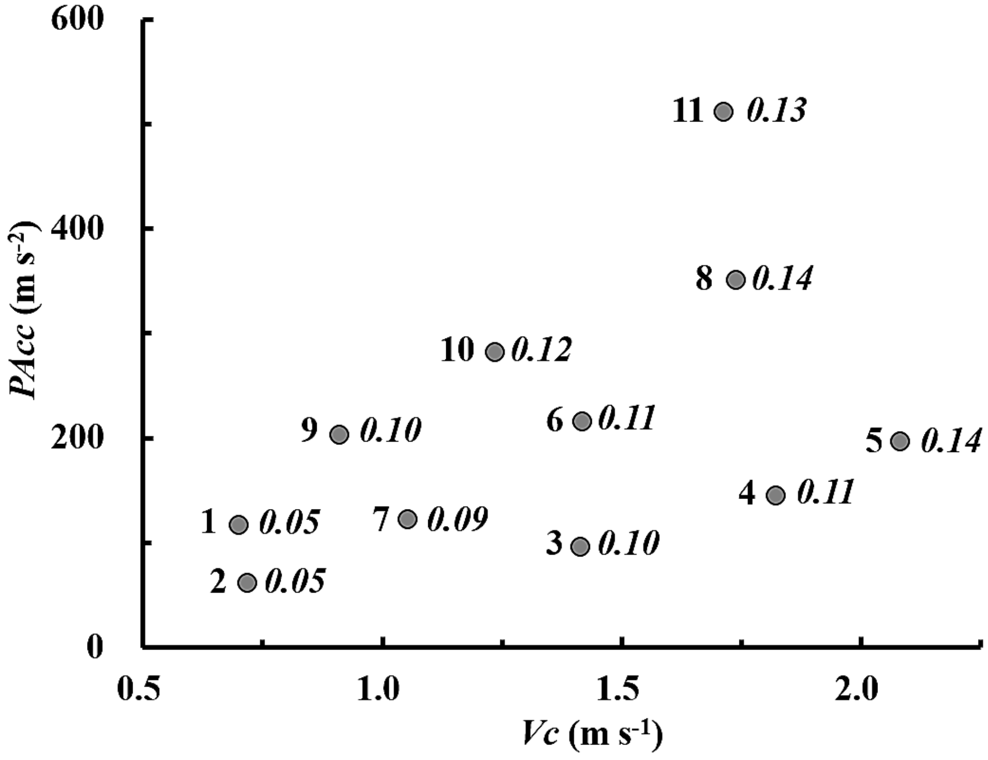

Fig. 3-3 Effect of *Vc* and *PAcc* on *d* of strawberries

Numbers to the left of ● indicate the test numbers;

details are given in **Table 3-2**.

Each value of *d* indicates the average value of three replicates.

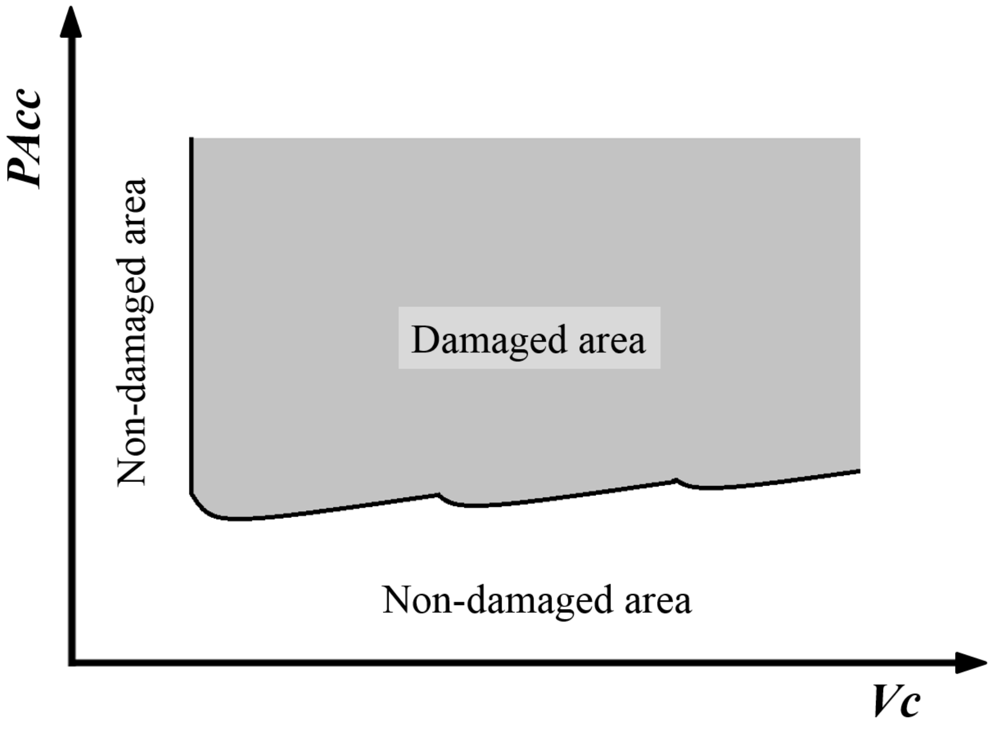

Fig. 3-4 Image of DBC obtained by half-sine shock pulse based on figures presented by Saito and Hasegawa[2], and Nakajima[3]

3.4　結　言

本章における検討により、繰り返し衝撃による物品の蓄積疲労損傷の発生において、*N*およびその逆数である *d* が *PAcc* と *Vc* の組み合わせにより様々に変化することを実証することができた。この点を踏まえ、実輸送を想定した包装条件下において、被包装物の蓄積疲労損傷評価を実施する場合、*PAcc* と *Vc* の組み合わせに対応する *d* を把握しておくとともに、両者を考慮した包装設計を行う必要がある。

参考文献

1) Newton, R. E.: Fragility Assessment –Theory and Test Procedure–, U.S. Naval Post Graduate School. Now available from Lansmont Corporation, 17 Mandecille Ce., Monterey, CA 93940 U.S.A., www.lansmont.com (1968).

2) 斎藤勝彦, 長谷川淳英: 輸送包装の基礎と実務, 幸書房, 東京, pp. 55–57 (2008).

3) 中嶋隆勝: 落下試験機による損傷境界曲線導出法の提案, 日本包装学会誌, **20**(2), 99–106 (2011).

第４章　実輸送を想定した包装条件下における蓄積疲労損傷評価（１）緩衝材の違いが繰り返し衝撃による被包装物の損傷発生に及ぼす影響

4.1　緒　言

第２章では、S-N 曲線理論を適用し、任意の *PAcc* に対応する *N* を算出することにより、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価を行った。一方、第３章において、*PAcc* と対となる *Vc* の違いにより、*d* が様々に変化する可能性を提示した。このことは、包装および衝撃発生の条件が多様な実輸送において、S-N 曲線を用いて *PAcc* に対応する *d* を算出し、損傷評価を行った場合、その精度において問題が生じる可能性を示唆している。

そこで本章では、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の発生に及ぼす *PAcc* と *Vc* の組み合わせの影響を実輸送で用いられる包装条件下で検証した。

また、任意の *PAcc* および *Vc* に対応する *d* を明らかにするとともに、各 *d* に対応する DBC を導出することによって、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の防止対策が容易になるものと考えられた。そこで、これまで注目されてこなかった、繰り返し衝撃による損傷評価における DBC 応用の可能性を明らかにするために、任意の *PAcc* と *Vc* の組み合わせに対応する *d* からの DBC の導出を試みた。

4.2　実　験

4.2.1　実験の方針

本研究は、**Fig. 4-1** に示す手順で実施した。以下に、各手順の詳細を述べる。

4.2.2　包装条件

PAcc および *Vc* の計測に用いた包装形態は、300 g の粘土を詰めた PET 樹脂製トレー（ダミーサンプル。外寸 115 mm × 170 mm × 50 mm）を 4 個梱包した段ボール箱に、箱と同一素材の蓋を載せ、これらをポリプロピレン製のバンドで結束したものであった（**Fig. 4-2**）。包装の総重量は約 1.3 kg であった。

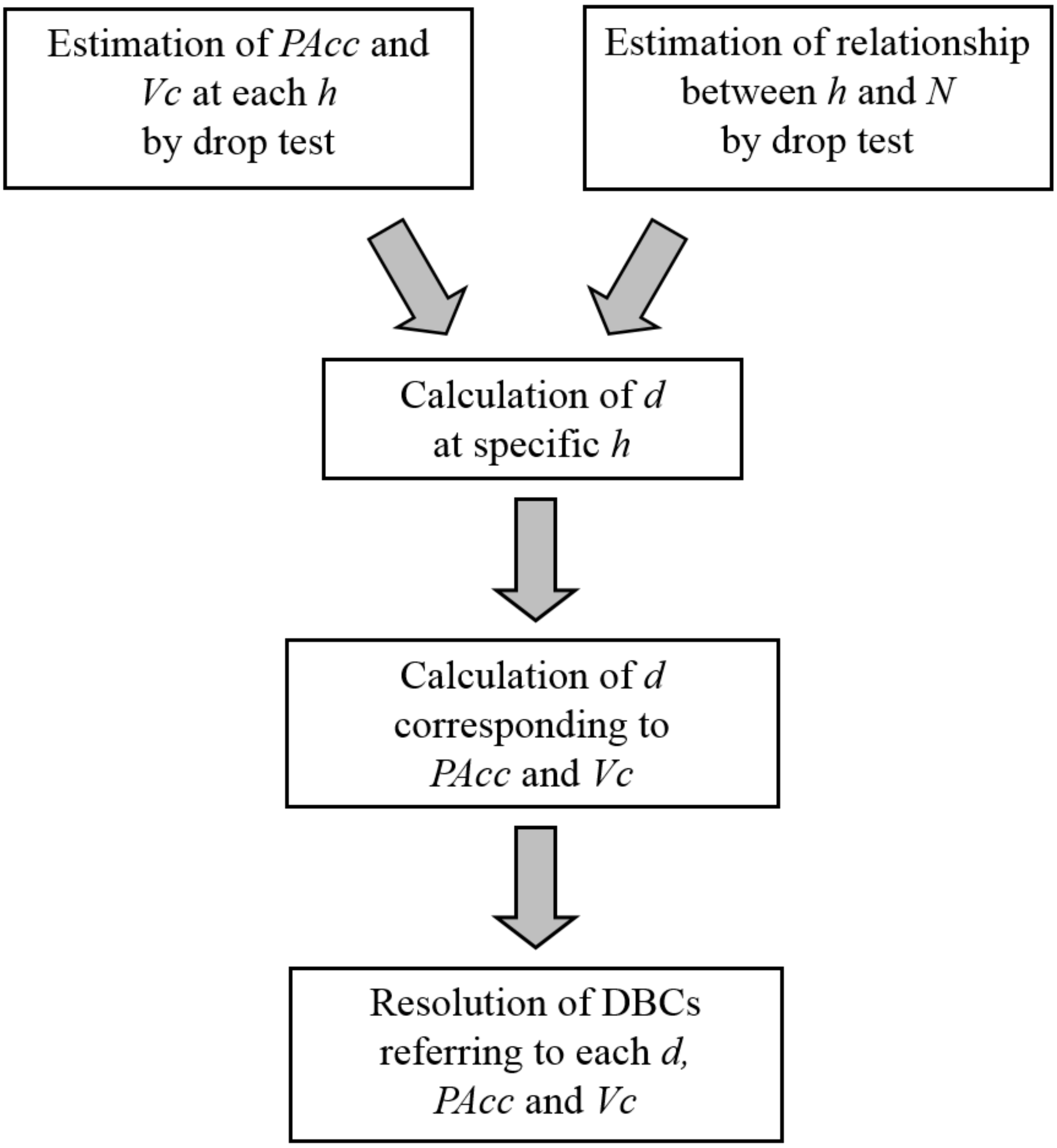

Fig. 4-1 Test flowchart in this chapter

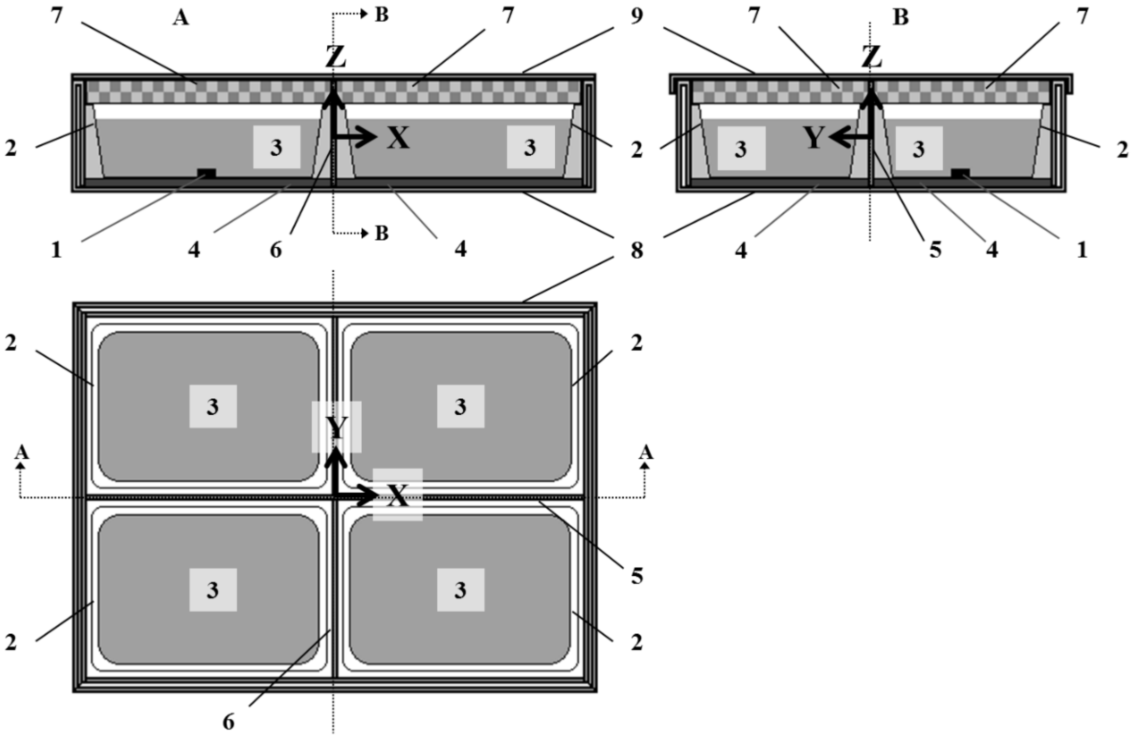

Fig. 4-2 Properties of dummy product for drop tests

1: Three-dimensional accelerometer: 8 mm (X) × 7 mm (Y) × 5.5 mm (Z)

2: PET resin-made tray: 166 mm (X) × 117 mm (Y) × 40 mm (Z)

3: Clay: 300 g

4: Corrugated fibreboard or silicone rubber sheet:
166 mm (X) × 117 mm (Y) × 5 mm (Z)

5: Corrugated fibreboard: 335 mm (X) × 3 mm (Y) × 72 mm (Z)

6: Corrugated fibreboard: 3 mm (X) × 236 mm (Y) × 72 mm (Z)

7: Urethane foam sheet: 166 mm (X) × 117 mm (Y) × 20 mm (Z)

8: Corrugated fibreboard: 355 mm (X) × 254 mm (Y) × 75 mm (Z)

9: Corrugated fibreboard: 355 mm (X) × 254 mm (Y) × 3 mm (Z)

4.2.3 *h*に対応する*PAcc*および*Vc*の計測条件

トレー内底面中央部に3次元加速度センサー（2366W、昭和測器）を両面テープで貼り付けた。加速度センターを衝撃計測・解析システム（SMH-12、神栄テクノロジー）および衝撃・振動解析ソフトウェア（SMS-500、神栄テクノロジー）に接続し、*PAcc*および*Vc*を計測した。ソフトウェアにより設定した計測時間は、1 s (500 μs × 2000 点)、トリガレベルおよびプリトリガは、0.4%および5%に設定した。ダミーサンプルの重心は必ずしもその中央に位置しておらず、そのことにより、ダミーサンプルが落下面に対して完全に垂直に落下しないことが想定された。そのため、*PAcc*および*Vc*の算出においては、上下、前後および左右の3次元方向の計測値を合成することとした。

4.2.4 落下試験条件

第2章の検証を踏まえ、同一の*h*から同一のダミーサンプルを落下させた際に使用する緩衝材の物性を変化させることにより、異なる*PAcc*および*Vc*条件が設定できるものと考えられた。物性が大きく異なる緩衝材として、段ボール板（Aフルート。LB210/MC120/LB210）およびシリコンゴムシート（267.2 kg m^{-3}、25%ひずみ時における圧縮応力：126.1 kPa）の2種類を選択した。いずれの素材も厚さは5 mmとした。それぞれの緩衝材を配置する場所は、*PAcc*および*Vc*の計測に用いる3次元加速度センサーの直近であることが望ましいと考えたため、箱内の底面（箱底とトレーの間）とした。青果物の実輸送における衝撃環境[1)]および第2章との整合性を考慮し、*h*は、0.05 m、0.10 m、0.15 m、0.20 m、0.25 mおよび0.30 mとした。落下時における*PAcc*を小さくし、後述する損傷評価のための落下繰り返し回数を多くするために、落下面は、10 mm厚のシリコンゴムシート（物性は前述のシリコンゴムシートと同一）とした。

供試した*h*の範囲内において、それぞれの緩衝材が線形バネ特性を有すると仮定すると、*PAcc*と*h*との関係は以下の式で表す事ができる。

$$PAcc = ah^{0.5} \qquad \text{式(4-1)}$$

ここで、*a*は定数である。また、この仮定条件下において*Vc*は以下の式により決定される。

$$Vc = (1+e)(2gh)^{0.5} \quad \text{式(4-2)}$$

ここで、eは反発係数、gは重力加速度（9.80665 m s^{-2}）である。供試したhの範囲内において反発係数の変動が小さければ、Vcと h との関係は以下の式で表す事ができる。

$$Vc = ah^{0.5} \quad \text{式(4-3)}$$

ここで、aは定数である。式(4-1)および式(4-3)を用いて、hに対応する$PAcc$およびVcを算出した。試験は落下条件ごとに 6 回～8 回行い、これを反復とした。

4.2.5　試料の損傷評価

供試材料は、第 2 章および第 3 章に準じ、イチゴ‘とちおとめ’果実を用いた。着色程度は 90%以上、第 2 章および第 3 章の方法に準じて測定した果実の果肉硬度は、約 6.1 N であった。1 個あたりの重量は約 15 g であった。第 3 章に準じ、1 トレーあたりに収納した果実数は 20 個（上段：3 個 × 4 列、下段：2 個 × 4 列）とした。**4.2.2** で示した包装条件において、各段におけるダミーサンプルの 1 つを、果実を詰めたトレーと交換し、**4.2.4** で示したh条件から繰り返し落下させることにより、1 回の落下ごとにNを調査した。第 3 章・**3.2.3** に従い、トレー中 85%（17 個）の果実に水浸状の圧迫傷もしくは果汁の滲出をともなう傷（第 2 章・**Fig. 2-2**）が発生した際に損傷したものと判定した。落下条件（hおよび落下面の素材）は **4.2.4** と同一とした。反復数は 2 とした。

4.2.6　hに対応する衝撃 1 回あたりの損傷度（d）の算出

dの算出は、以下の手順で行った。

①: hの$PAcc$への変換の可能性について式（4-1）を用いて検討。

②: ①で得られた結果を第 1 章・式（1-1）にあてはめ、$PAcc$とNの関係式を算出。また、Nとhの関係式を算出。

③：②で得られた結果を第３章・式（3-1）にあてはめ、Nを dに変換。

④：hと dの関係式を算出。

なお、②は第２章において果実の損傷発生における $PAcc$と Nの関係が S-N 曲線で表せたことを根拠とした上で行った。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 hに対応する $PAcc$および Vc

h = 0.05 m、0.10 m、0.15 m、0.20 m、0.25 m および 0.30 m と対応する $PAcc$は、箱内底面に段ボール板を配置した場合、それぞれ 323.3 m s^{-2}、450.0 m s^{-2}、651.0 m s^{-2}、840.4 m s^{-2}、917.3 m s^{-2} および 983.3 m s^{-2} であった（**Fig. 4-3**）。シリコンゴムシートを配置した場合は、それぞれ 322.1 m s^{-2}、460.2 m s^{-2}、627.6 m s^{-2}、790.2 m s^{-2}、902.3 m s^{-2} および 986.3 m s^{-2} であり、いずれの hにおいても、それぞれの緩衝材の間に有意な差はなかった。なお、これらの結果を式（4-1）へ適合させると、段ボール板を配置した場合では、

$$PAcc = 2265.8h^{0.6618} \ (R^2 = 0.9827) \qquad 式(4\text{-}4)$$

シリコンゴムシートを配置した場合では、

$$PAcc = 2175.6h^{0.6486} \ (R^2 = 0.9933) \qquad 式(4\text{-}5)$$

となる関係式がそれぞれ得られた。べき乗部分の数値に着目すると、いずれも 0.5 とはなっておらず、一部の hにおいて、線形バネ特性が仮定できないものと推察された。しかし、いずれの式においても高い決定係数が得られており、調査した hの範囲内では、いずれの緩衝材を用いた場合においても、hから $PAcc$に変換可能であるものと判断する。

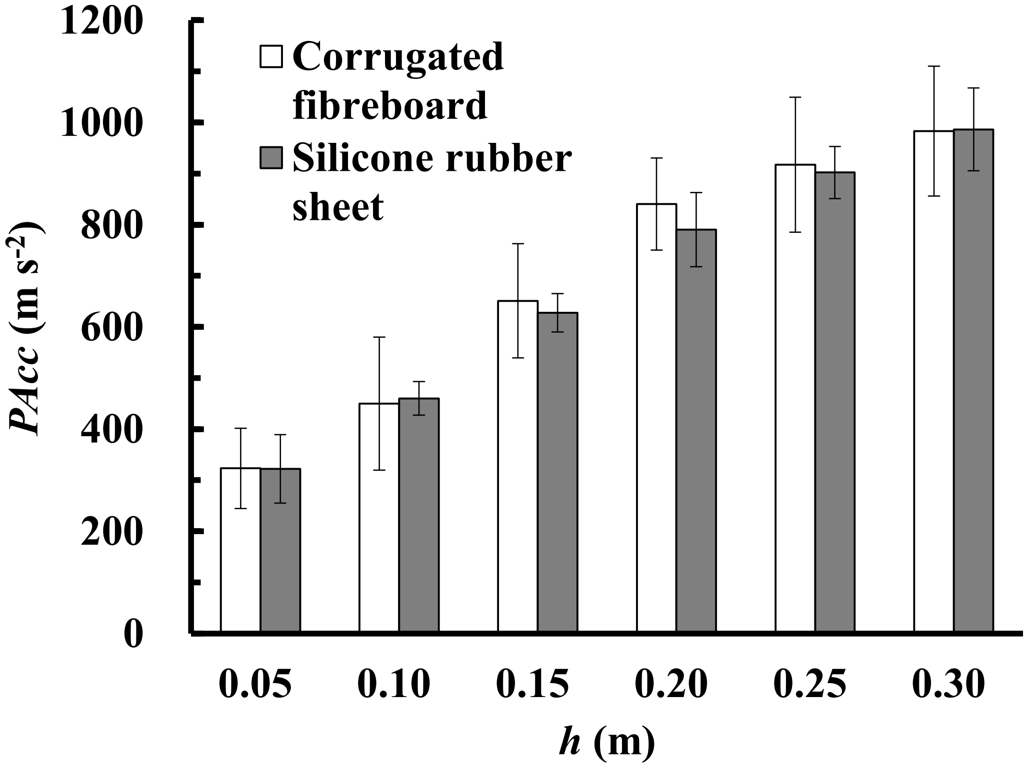

Fig. 4-3 Relationship between *h* and *PAcc*
Each error bar shows the standard deviation (SD) of
each average value (n = 6–8).

次に、*h* に対応する *Vc* をみると、段ボール板を配置した場合では、それぞれ 1.57 m s^{-1}、2.16 m s^{-1}、2.61 m s^{-1}、2.98 m s^{-1}、3.30 m s^{-1} および 3.65 m s^{-1} であった（**Fig. 4-4**）。また、シリコンゴムシートを配置した場合では、それぞれ、1.63 m s^{-1}、2.35 m s^{-1}、2.69 m s^{-1}、3.38 m s^{-1}、3.80 m s^{-1} および 4.01 m s^{-1} となり、*h* = 0.20 m～0.30 m の範囲においては、段ボール板を配置した場合と比較し、有意に大きくなった。これらの結果を式（4-3）に照らし、段ボール板を配置した場合では、

$$Vc = 6.3632h^{0.4686} \ (R^2 = 0.9997) \qquad \text{式(4-6)}$$

シリコンゴムシートを配置した場合では、

$$Vc = 7.5358h^{0.5130} \quad (R^2 = 0.9916) \qquad 式(4\text{-}7)$$

となる関係式が得られた。

以上より、いずれの素材を用いた場合においても、本章における落下試験条件下においては、*h* から *PAcc* および *Vc* に変換可能であることが確認できた。

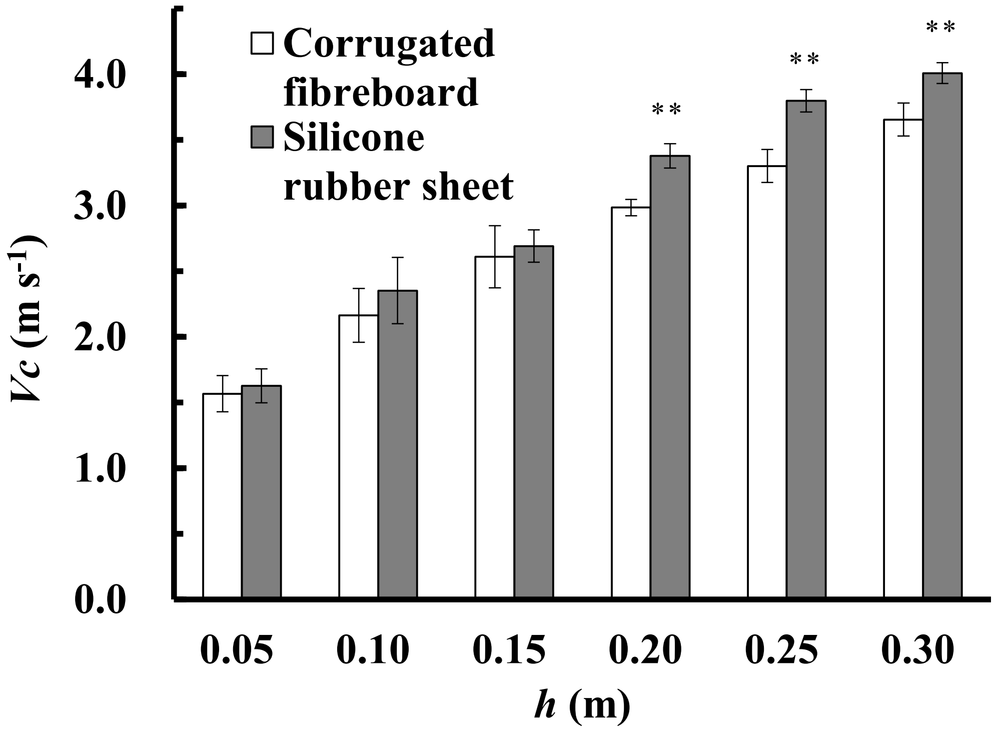

Fig. 4-4 Relationship between *h* and *Vc*

Each error bar shows the SD of each average value (n = 6–8).

** Indicates significant differences ($P < 0.01$) with Welch's *t*-test.

4.3.2 *h* に対応する *d*

h = 0.05 m、0.10 m、0.15 m、0.20 m、0.25 m および 0.30 m と対応する *N* の平均値は、段ボール板を配置した場合では、それぞれ 34.0 回、19.0 回、15.0 回、12.0 回、7.5 回および 6.5 回であった（**Fig. 4-5A**）。シリコンゴムシートを配置した場合では、それぞれ 34.0 回、19.0 回、14.5 回、10.5 回、7.0 回および 5.0 回となり（**Fig. 4-5B**）、*h* = 0.20 m～0.30 m の範囲において、段ボール板を配置し

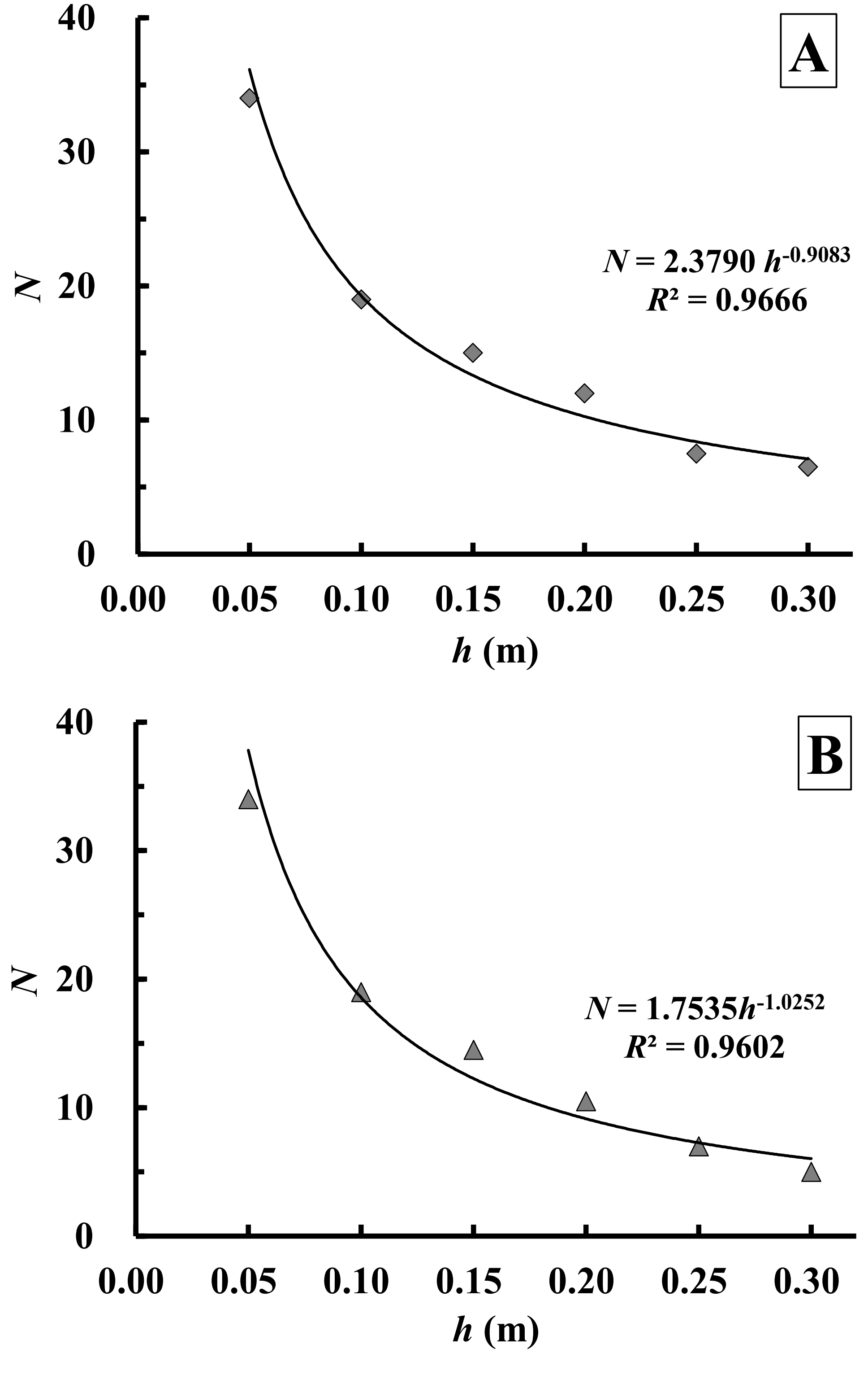

Fig. 4-5 Relationship between *h* and *N* using corrugated fibreboard (**A**) or silicone rubber sheet (**B**)

Each value shows the average value of duplicate tests.

た場合と比較し、小さな値となった。**4.3.1** において、この h の範囲ではそれぞれの緩衝材の間に *PAcc* に関する有意差はみられなかったが、シリコンゴムシートを配置した場合、*Vc* が有意に大きかった。従って、この N における差異は、*Vc* の違いによりもたらされたものと考えられた。

式（4-4）および式（4-5）より、h から *PAcc* に変換可能であることが確認できたことに基づき、第 1 章・式（1-1）の *PAcc* を h に読み替えて、h と N との関係をみると、段ボール板を配置した場合では、

$$N = 2.3790h^{-0.9083} \ (R^2 = 0.9666) \qquad 式(4\text{-}8)$$

シリコンゴムシートを配置した場合では、

$$N = 1.7535h^{-1.0252} \ (R^2 = 0.9602) \qquad 式(4\text{-}9)$$

となる関係式が得られた。これらの式と第 3 章・式（3-1）を用いて、h = 0.05 m、0.10 m、0.15 m、0.20 m、0.25 m および 0.30 m と対応する d を算出すると、段ボール板を配置した場合、それぞれ 0.03、0.05、0.08、0.10、0.12 および 0.14 となる。一方、シリコンゴムシートを配置した場合では、それぞれ 0.03、0.05、0.08、0.11、0.14 および 0.17 となり、h = 0.20 m～0.30 m の範囲において、シリコンゴムシートを配置した場合では、段ボール板を配置した場合と比較し、d が 12～18%大きくなるものと予測された。

この結果は、被包装物の繰り返し衝撃による損傷評価において、第 1 章・式(1-1)および第 3 章・式(3-1)のみから d を算出しておく方法、すなわち S-N 曲線よる損傷評価手法を用いた場合、使用する緩衝材の種類あるいは緩衝材使用の有無により d の値を見誤る可能性を示唆するものであった。

それぞれの緩衝材を配置した場合における損傷評価の結果に基づき、d を横軸に、h を縦軸にとって、それらの結果をプロットしたものを **Fig. 4-5** に示す。段ボール板を配置した場合では、

$$h = 2.5974d^{1.1013} \ (R^2 = 1.000) \qquad 式(4\text{-}10)$$

シリコンゴムシートを配した場合では、

$$h = 1.7296d^{0.9756} \quad (R^2 = 1.000) \qquad \text{式(4-11)}$$

となる関係式が得られた。

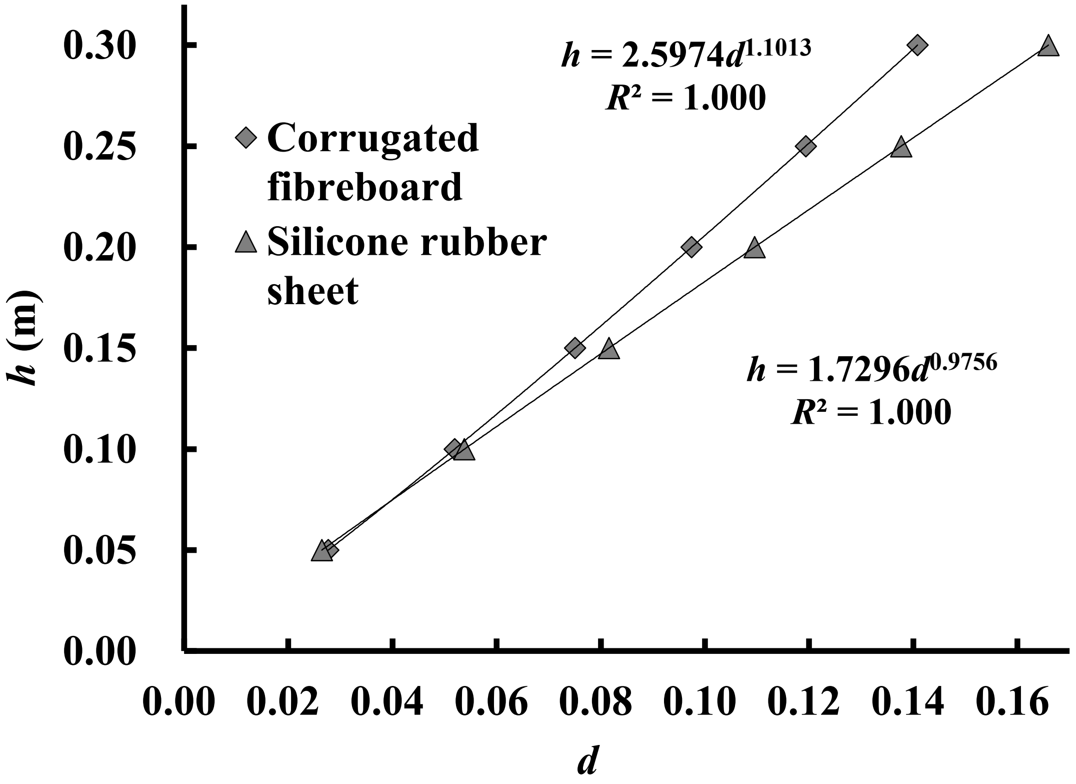

Fig. 4-5 Relationship between *d* and *h* as estimated with results shown in **Fig. 4-4**

4.3.3 *d*を考慮したDBCの導出

式(4-10)および式(4-11)を用いて、N = 24回、20回、16回、12回および8回、すなわち d = 0.042、0.050、0.063、0.083および0.125に該当する h を算出すると、段ボール板を配置した場合では、0.08 m、0.10 m、0.12 m、0.17 mおよび0.26 m、シリコンゴムシートでは、0.08 m、0.09 m、0.12 m、0.15 mおよび0.23

m となる。また、それらの h に該当する $PAcc$ および Vc を式(4-4)～式(4-7)を用いて算出し、同一の d 値を線で結ぶと **Fig. 4-6** に示す DBC が得られた。本章における試験条件では、$PAcc$ および Vc の組み合わせ条件が限定されたため、これにともない DBC の範囲は限定的であったが、このように $PAcc$ および Vc より決定される任意の d に対する DBC の導出が可能であることが確認できた。

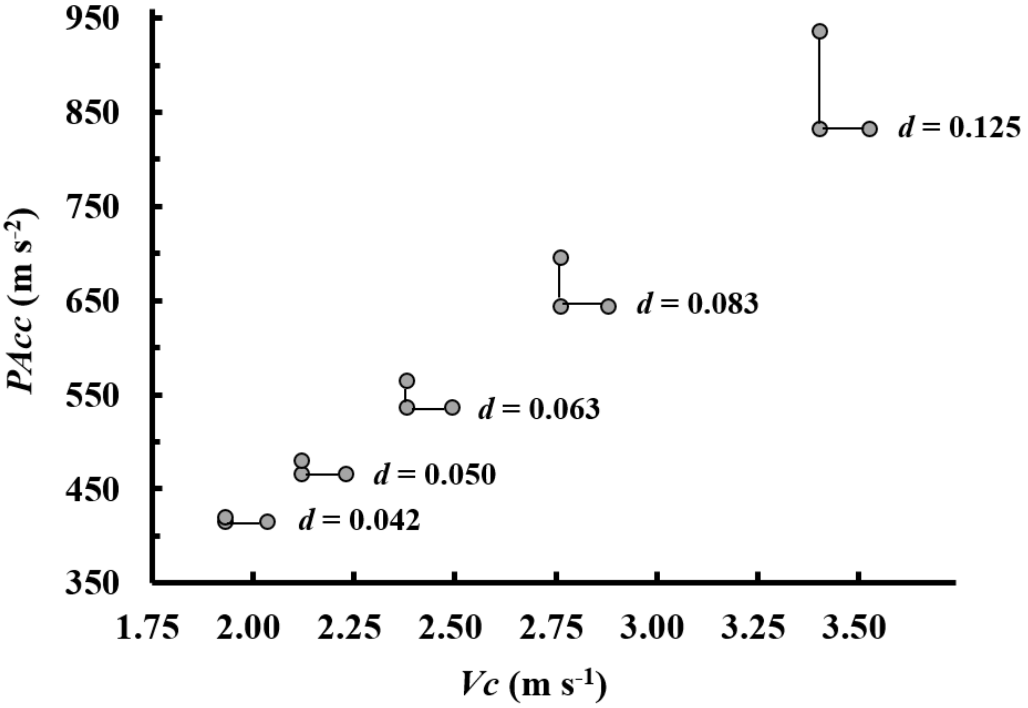

Fig. 4-6 DBCs corresponding to d

The values of 0.042, 0.050, 0.063, 0.083 and 0.125 mean that the tested material was damaged by 24, 20, 16, 12, and 8 shocks, respectively.

4.4 結　言

実輸送に用いられる包装条件下において、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の評価を $PAcc$ および d の関係のみに基づいて実施した場合、誤った d の値を算出することを実証した。

また、*PAcc* および *Vc* と *d* の関係を予め評価した上で、任意の *d* に対応するDBC を導出しておくことにより、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価の精度を高めることができるものと考えられた。

参考文献

1) Ishikawa, Y., Kitazawa, H. and Shiina, T.: Vibration and Shock Analysis of Fruit and Vegetables Transport ―Cherry Transport from Yamagata to Taipei―, Japan Agricultural Research Quarterly, **43**(2), 129–135 (2009).

第５章　実輸送を想定した包装条件下における蓄積疲労損傷評価（２）
多段積み包装された被包装物の損傷発生に及ぼす繰り返し衝撃の影響

5.1　緒　言

第３章では、繰り返し衝撃による物品の蓄積疲労損傷の発生において、*PAcc*および *Vc* の組み合わせにより、*d* が様々に変化することを明らかにした。また、第４章では、実輸送を想定した段ボール箱に梱包された被包装物を用いた検証を行い、使用する緩衝材の違いにより *d* が変化すること、およびその要因として、*PAcc* と対となる *Vc* の違いが影響したことを実証した。

第４章で検討した以外の、実輸送中に *PAcc* および *Vc* の組み合わせが異なる状況として、多段積みされた包装形態における、段（部位）の違いが想定された。

段積みされた被包装物の衝撃に対する易損性については、線形および非線形モデルによる数値解析を用いた評価がなされている [1),2)]。しかし、繰り返し衝撃による蓄積疲労により損傷する被包装物を対象として、段積みされた包装条件下において段ごとの損傷を評価した事例はない。第２章においては、5 段積みされた段ボール箱のうち、1 段目（最下段）の箱内に梱包された被包装物の損傷発生における、*PAcc* と *N* の関係のみを評価しており、その他の段における *N* もしくは *d* や、第３章および第４章でその重要性が示唆された *Vc* の影響については未検討である。

段の違いにより *PAcc* と *Vc* の組み合わせが異なるとともに、このことにともない *d* が変化すると仮定すれば、1 段目など特定の段に配置されたサンプルより得られた *d* に基づいてその他の段における損傷評価を行った場合、誤った *d* の値を算出することとなる。

以上の点を踏まえ、本章では 5 段積みされた段ボール箱を落下させた際におけ

る段ごとの *PAcc* および *Vc* を明らかにするとともに、段の違いが被包装物の *d* に及ぼす影響について検討した。

5.2 実　験

5.2.1 実験の方針

本章では、段の違いにより *PAcc* および *Vc* の組み合わせが異なり、これにともない各段における被包装物の *d* が変化するという仮説を、1 段目とその他の段における *d* を比較することにより検証することとした。試験の流れを **Fig. 5-1** に示す。

まず、1 段目における、任意の *h* に対応する *PAcc* および *Vc* を計測した。次にこれらの関係の数式化を試みたとともに、これら 2 要因に対応する *d* を算出した。2 段目～5 段目においても *h* に対応する *PAcc* および *Vc* を計測するとともに、これらと対応する *d* を算出した。上述した仮説が支持される場合、任意の *PAcc* に対応する *d* は、1 段目とその他の段において異なるものと想定される。そこで、この想定される差異について、1 段目の被包装物を対象に数式化した *h*、*PAcc* および *Vc* の関係から考察することとした。

5.2.2 試　料

損傷評価に用いる試料は、第 3 章および第 4 章に準じた。すなわち、茨城県内で生産された着色程度 : 80%～100%、果肉硬度 : 約 6.1 N のイチゴ‘とちおとめ’果実を用いた。また、トレーに収納した果実の数についても、それらの章に準じた。

5.2.3 包装条件

PAcc および *Vc* の計測に用いた包装形態は、300 g の粘土を詰めた PET 樹脂製トレー（ダミーサンプル。外寸 115 mm × 170 mm × 50 mm）を 4 個梱包した段ボール箱を 5 個積み重ね、ポリプロピレン製のバンドで結束したものであった（**Fig. 5-2**）。包装の総重量は約 6.5 kg であった。

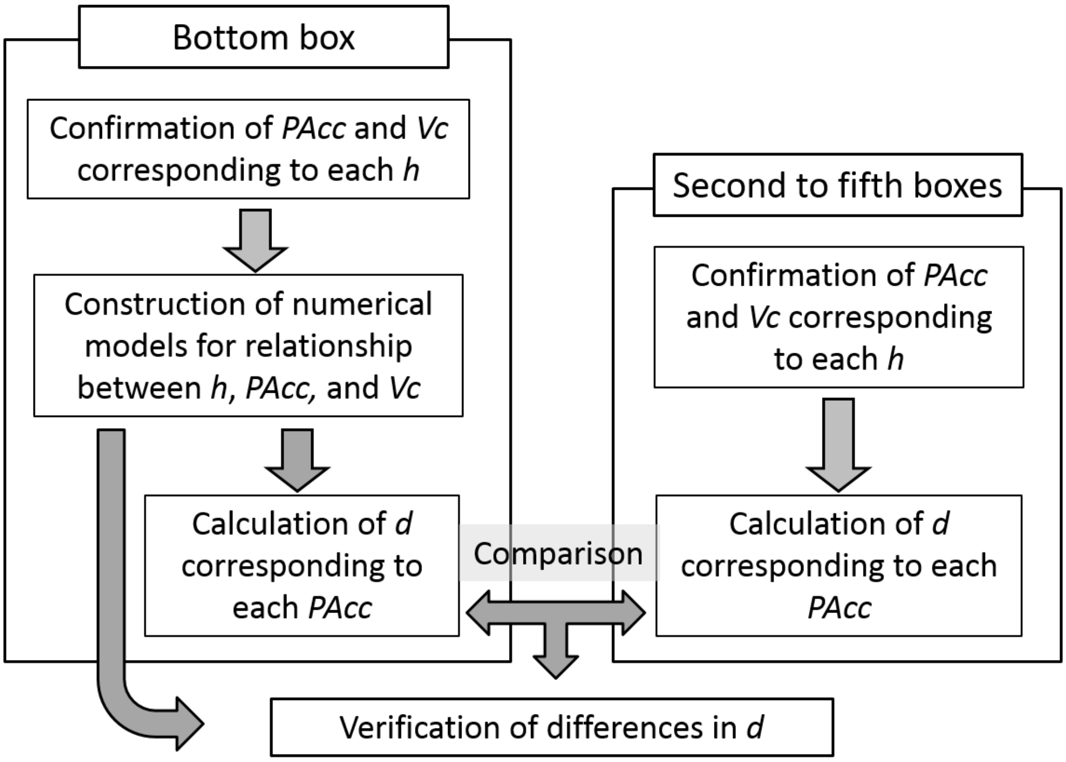

Fig. 5-1 Flowchart of test in this chapter

Fig. 5-2 Form of packaging for estimation of *PAcc*, *Vc*, and fruit damage

5.2.4　*PAcc* および *Vc* の計測および落下試験条件

ダミーサンプルを用いた *PAcc* および *Vc* の計測条件は、第 4 章・**4.2.3** に準じた。

解析対象とした *h* は、第 2 章および第 4 章における検証条件を考慮し、0.05 m、0.10 m、0.15 m および 0.20 m とした。ただし、1 段目については後述する近似式の導出を想定し、これに加えて、0.03 m および 0.25 m からの落下についても解析対象とした。落下面は、鋼鉄板上に敷いた 10 mm 厚のシリコンゴムシート（密度：267.2 kg m^{-3}、25%ひずみ時における圧縮応力：126.1 kPa）とした。落下は手動で行った。試験は落下条件ごとに 11 回～12 回行い、これを反復とした。

5.2.5　1 段目における *h* と *PAcc* および *Vc* の変換

ここでは、第 2 章および第 4 章で用いた変換手法を用いた。すなわち、落下試験により、各 *h* に対応する *PAcc* を計測し、これらの関係の累乗近似化を試みた。

また、第 4 章では、*h* と *Vc* との関係を数式化することにより、*d* を与える *Vc* の推定を行った。本章においてもこれを応用し *h* と *Vc* の関係について数式化を試みた。

5.2.6　試料の損傷評価

5.2.3 で示した包装条件において、各段におけるダミーサンプルの 1 つを、果実を詰めたトレーと交換し、**5.2.4** で示した各 *h* の条件により繰り返し落下させることにより、各段における *N* を調査した。トレーに収納された果実数は 20 個であり、その重量は 300 g～320 g の範囲にあった。損傷判定方法は第 4 章に従った。すなわち、トレー中 85%（17 個）の果実に水浸状の圧迫傷もしくは果汁の滲出をともなう傷が発生した際に損傷したものと判定した。

評価の結果を第 1 章・式（1-1）および第 4 章・式（4-1）に示した関係式と比較し、*h* と *N* の関係式を算出した。また、第 3 章・式（3-1）を用いて *PAcc* に対応する *d* を算出した。反復数は 5～7 とした。

5.3　実験結果および考察

5.3.1　*h* と *PAcc* および *Vc* の関係

まず、1 段目における h = 0.03 m、0.05 m、0.10 m、0.15 m、0.20 m および 0.25 m と対応する *PAcc* は、194.7 m s^{-2}、313.4 m s^{-2}、442.0 m s^{-2}、624.8 m s^{-2}、914.1 m s^{-2} および 989.7 m s^{-2} であった（**Fig. 5-3**）。この結果を第 4 章・式（4-1）と比較すると、

$$PAcc = 2823.9h^{0.7601} \quad (R^2 = 0.9847) \qquad 式(5\text{-}1)$$

で示される関係式および高い決定係数が得られた。このことから、解析対象とした h の範囲内において、h は *PAcc* に変換可能であるものと判断できた。

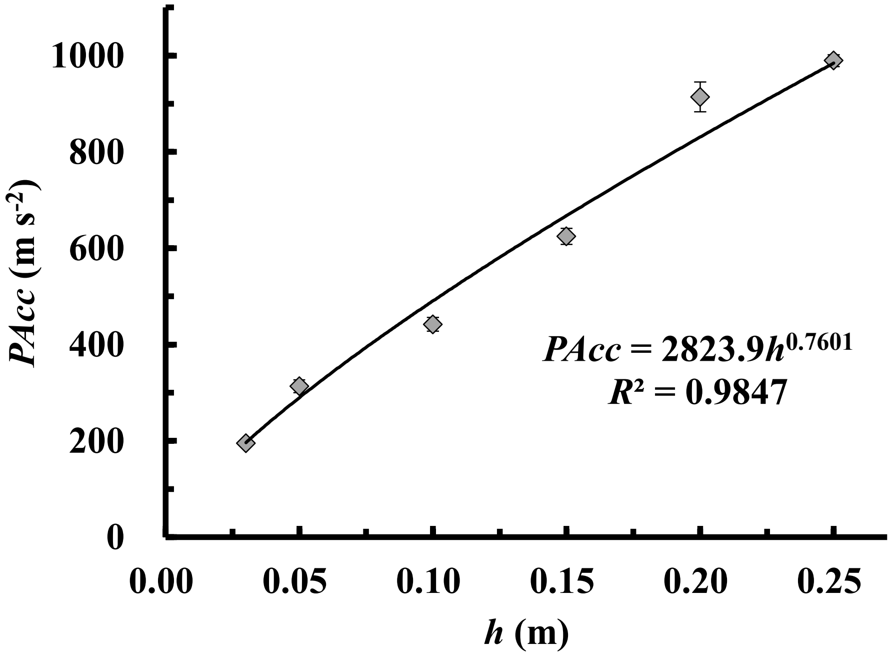

Fig. 5-3 Effects of differences in *h* on occurrence of *PAcc* at first (bottom) layer.

Each error bar shows the standard error (SE; n = 11–12).

また、h に対応する Vc は、それぞれ 0.94 m s^{-1}、1.49 m s^{-1}、1.87 m s^{-1}、2.22 m s^{-1}、2.56 m s^{-1} および 3.02 m s^{-1} であった（**Fig. 5-4**）。それらの関係は以下に示す式（5-2）で表すことができ、1 段目のダミーサンプルにおいては、h は Vc に変換できるものと考えられた。

$$Vc = 5.9065h^{0.5002} \quad (R^2 = 0.9733) \qquad 式(5\text{-}2)$$

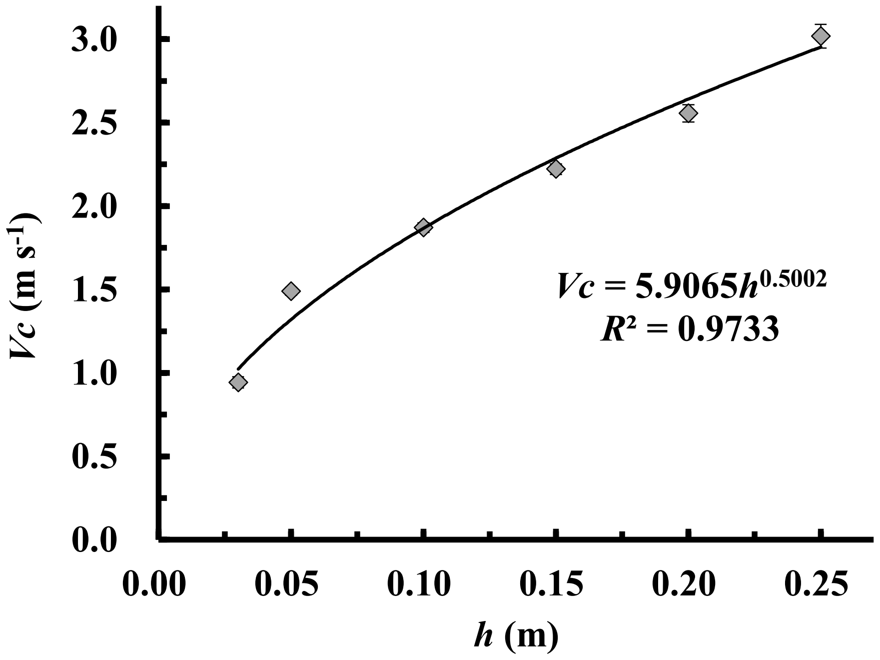

Fig. 5-4 Effects of differences in *h* on occurrence of *Vc* at first (bottom) layer

Each error bar shows the SE (n = 11–12).

また、2 段目～5 段目における各 h に対応する *PAcc* を **Table 5-1** に示す。各 h に対応する *PAcc* は、1 段目（**Fig. 5-1**）と比較すると 40%～78%減少しており、印加された衝撃の大半は、1 段目において減衰したものと考えられた。一方で、2 段目と 5 段目における *PAcc* を比較すると、減少程度は最大で 30%程度であり、これらの段の間における衝撃の減衰程度は小さいものと考えられた。

次に各 h に対応する Vc を **Table 5-2** に示す。各 h に対応する Vc は、上段になるほど大きくなる傾向がみられ、5 段目では 1 段目（**Fig. 5-4**）と比較し、最大で 1.3 倍程度増加した。

Table 5-1
Effects of different h values and layers on the occurrence of $PAcc$ (m s^{-2})

h (m)	Layer			
	2	3	4	5
0.05	139.2 ± 15.6[z]	124.5 ± 5.3	107.5 ± 5.5	117.8 ± 7.0
0.10	260.9 ± 9.2	220.9 ± 20.5	210.4 ± 8.5	177.7 ± 9.8
0.15	371.6 ± 9.6	386.6 ± 5.4	340.3 ± 16.0	284.3 ± 3.8
0.20	498.6 ± 3.5	421.1 ± 9.4	450.5 ± 7.1	459.3 ± 6.3

[z]Average ± SE (n = 11–12)

Table 5-2
Effects of different h values and layers on the occurrence of Vc (m s^{-1})

h (m)	Layer			
	2	3	4	5
0.05	1.48 ± 0.02[z]	1.65 ± 0.02	1.68 ± 0.03	1.66 ± 0.05
0.10	1.95 ± 0.03	2.07 ± 0.04	2.14 ± 0.02	2.46 ± 0.03
0.15	2.32 ± 0.01	2.50 ± 0.03	2.77 ± 0.02	2.91 ± 0.02
0.20	2.55 ± 0.02	2.78 ± 0.02	3.06 ± 0.04	3.42 ± 0.02

[z]Refer to **Table 5-1**

5.3.2　1 段目と 2 段目～5 段目における d の比較

まず、1 段目についてみると、h = 0.03 m、0.05 m、0.10 m、0.15 m、0.20 m および 0.25 m に対応する N の平均値は、それぞれ 46.4 回、36.3 回、20.3 回、16.2 回、12.4 回および 9.2 回であった（**Fig. 5-5**）。第 1 章・式（1-1）より、この結果は以下の式に示す関係で表すことができた。

$$N = 8266.1PAcc^{-0.9704}\ (R^2 = 0.9683) \quad 式(5\text{-}3)$$

また、**5.3.1** で示した $PAcc$ に対応する d は、それぞれ 0.022、0.028、0.052、

0.066、0.092 および 0.115 と算出され（**Fig. 5-6**）、これらの関係は以下の式で表すことができた。

$$d = 0.0001 PAcc^{0.9704} \quad (R^2 = 0.9683) \qquad 式(5\text{-}4)$$

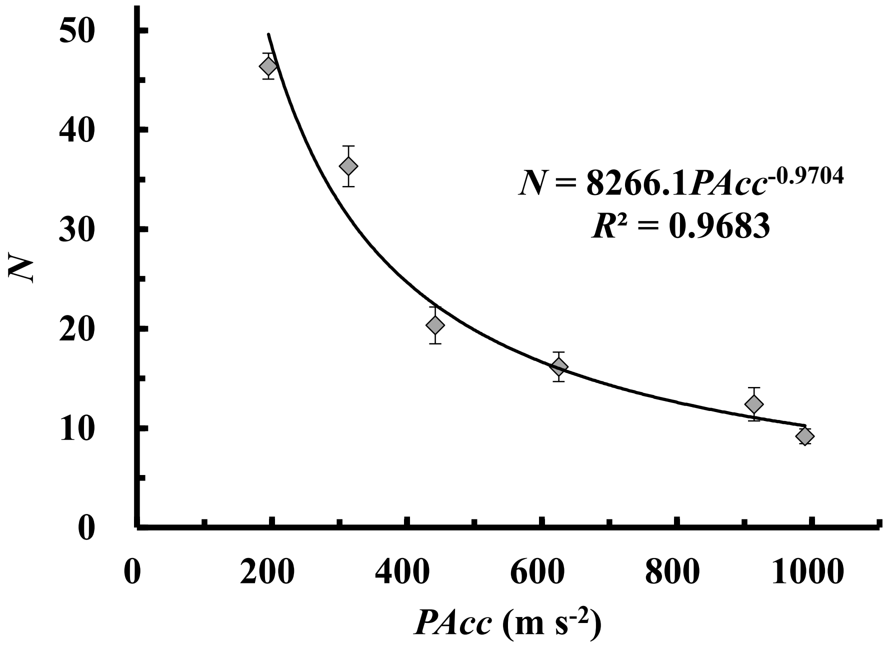

Fig. 5-5 Effects of differences in *PAcc* on shock frequency with regard to *N* at first (bottom) layer

Each error bar shows the SE (n = 5–7).

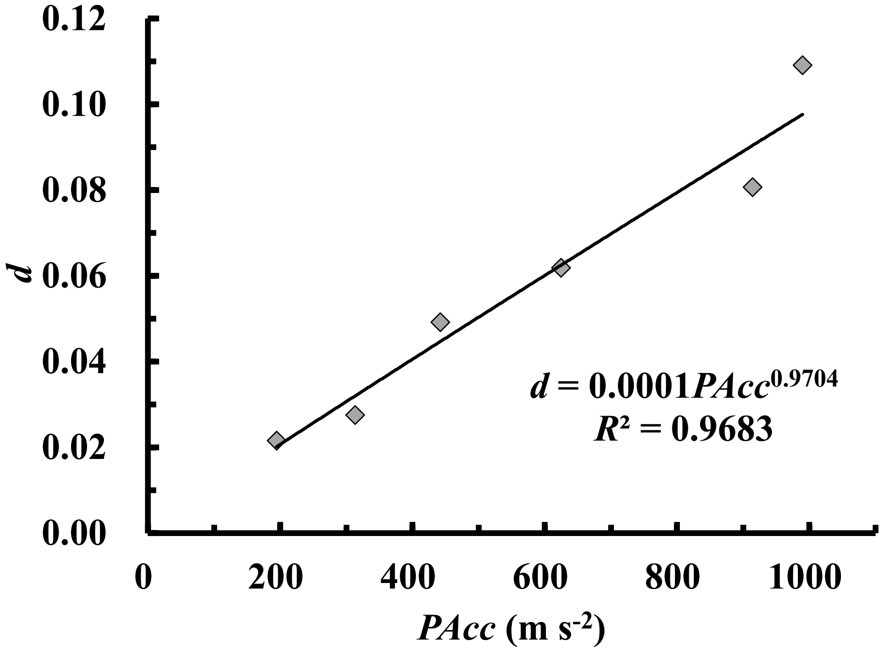

Fig. 5-6 Effects of differences in *PAcc* on shock frequency with regard to *d* at first (bottom) layer

2 段目～5 段目における、同一の *h* に対応する *d* は、1 段目（**Fig. 5-6**）と比較し、小さかった（**Table 5-3**）。ここで、1 段目の *PAcc* と *d* の関係から得られた式（5-4）を用いて、2 段目～5 段目における *PAcc* に対応する *d* を算出した。算出結果と実測値とを比較すると、予測値には実測値よりも値が小さくなる方向に差異が生じていること、およびその差異は、上段になるほど大きくなることが明らかとなった（**Table 5-4**）。第 4 章では、果実の繰り返し衝撃による損傷発生において *PAcc* が同一であっても、*Vc* が増加することにより、*d* が大きくなることを確認している。従って、本章においても、それらの差異が生じた理由として、*Vc* の大きさの違いが影響したものと考えられた。

この点を明らかにするために、1 段目において 2 段目～5 段目における *PAcc* と同等の *PAcc* が生ずると想定される *h* を式（5-1）より算出するとともに、これにともなう *Vc* を式（5-2）により算出した。その結果、*Vc* の値はいずれも 2 段目～5 段目において発生した *Vc*（**Table 5-2**）と比較し小さくなるものと推定された（**Table 5-5**）。このことから、1 段目における *PAcc* と *d* の関係を用いて 2 段目～5 段目の *d* を予測した際に生じた差異は、*Vc* の影響を過小評価していることに起

因したものと考えられた。

Table 5-3

Shock frequency with regard to *N* and *d* in the second to fifth boxes

Layer	*h* (m)	*PAcc* ($m\ s^{-2}$)	*Vc* ($m\ s^{-1}$)	*N*	*d*
2	0.05	139.2	1.48	47.4 ± 2.9[z]	0.022
	0.10	260.9	1.95	29.6 ± 3.9	0.037
	0.15	371.6	2.32	19.4 ± 1.1	0.052
	0.20	498.6	2.55	17.6 ± 2.1	0.061
3	0.05	124.5	1.65	49.2 ± 2.9	0.021
	0.10	220.9	2.07	34.8 ± 1.4	0.029
	0.15	386.6	2.50	23.8 ± 2.9	0.058
	0.20	421.1	2.78	15.0 ± 1.3	0.070
4	0.05	107.5	1.68	49.8 ± 0.9	0.020
	0.10	210.4	2.14	34.2 ± 3.5	0.031
	0.15	340.3	2.77	17.8 ± 1.3	0.058
	0.20	450.5	3.06	15.6 ± 2.2	0.070
5	0.05	117.8	1.66	36.4 ± 3.2	0.029
	0.10	177.7	2.46	29.0 ± 1.7	0.035
	0.15	284.3	2.91	21.6 ± 1.2	0.047
	0.20	459.3	3.42	13.2 ± 0.7	0.077

[z]Average ± SE (n = 5)

Table 5-4
Measured values of d (A) versus predicted d (P) calculated from the relationship between $PAcc$ and d in the bottom box

Layer	h (m)	$PAcc$ ($m\ s^{-2}$)	d Actual (A)	d Predicted (P)[z]	Error (%)[y]
2	0.05	139.2	0.022	0.012	43.6
	0.10	260.9	0.037	0.022	38.8
	0.15	371.6	0.052	0.032	39.7
	0.20	498.6	0.061	0.041	32.7
3	0.05	124.5	0.021	0.011	47.1
	0.10	220.9	0.029	0.019	34.4
	0.15	386.6	0.058	0.032	44.5
	0.20	421.1	0.070	0.035	50.1
4	0.05	107.5	0.020	0.009	53.1
	0.10	210.4	0.031	0.018	40.9
	0.15	340.3	0.058	0.029	49.8
	0.20	450.5	0.070	0.038	45.8
5	0.05	117.8	0.029	0.010	64.1
	0.10	177.7	0.035	0.015	56.3
	0.15	284.3	0.047	0.024	48.3
	0.20	459.3	0.077	0.038	50.5

[z]Calculated from Equation (5-4)

[y]$|(P-A)|/A \times 100$

Table 5-5
Equivalent *h* and *Vc* in the bottom box corresponding to the same *PAcc* in the second to fifth boxes

Layer	*PAcc* ($m\ s^{-2}$)	Equivalent *h* (m)[z]	Equivalent *Vc* ($m\ s^{-1}$)[y]
2	139.2	0.018	0.79
	260.9	0.040	1.19
	371.6	0.064	1.49
	498.6	0.094	1.81
3	124.5	0.016	0.74
	220.9	0.033	1.07
	386.6	0.067	1.53
	421.1	0.075	1.62
4	107.5	0.013	0.67
	210.4	0.031	1.03
	340.3	0.057	1.41
	450.5	0.082	1.69
5	117.8	0.014	0.71
	177.7	0.025	0.93
	284.3	0.045	1.26
	459.3	0.084	1.71

[z]Calculated from Equation (5-1)
[y]Calculated from Equation (5-2)

5.4　結　言

以上の検証より、多段積みされた包装形態において、段の違いにより任意の *PAcc* に対応する *Vc* が様々に変化することを実証した。また、任意の衝撃が印加された際の *d* が段により異なることが明らかとなったが、その理由が *Vc* の影響によることを実証した。

さらに、本章の結果は、多段積み包装される被包装物の損傷防止対策、すなわち緩衝包装設計において、特定の段における *PAcc* および *Vc* に基づいて算出した *d* を用いて、それ以外の段における損傷を見積った場合、包装全体における損傷

程度を見誤る危険性を示唆している。

これらのことから、多段積みされた被包装物を対象として、繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷を防止するための対策を講じる際には、任意の衝撃が印加された際に想定される段ごとの $PAcc$ および Vc の組み合わせに対応する d を予め明らかにしておく必要がある。

参考文献

1) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 久保雅義, 寺岸義春: 段積み・粘弾性支持された製品の線形モデルによる衝撃強さの検討, 日本包装学会誌, **8**(3), 123–134 (1999).

2) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 久保雅義, 寺岸義春: 段積みされた製品の非線形モデルによる衝撃強さの検討, 日本包装学会誌, **9**(1), 33–46 (2000).

第６章　蓄積疲労損傷の制御を可能とする包装方法の提案

6.1　緒　言

第５章において、多段積みされた包装形態において段の違いにより任意の *PAcc* と対となる *Vc* が多様であることを実証するとともに、各段に配置された被包装物の *d* が様々に変化することを明らかにした。これらのことから、多段積みされた被包装物の繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷を防止するためには、任意の衝撃が包装全体に印加された際に、各段において想定される *PAcc* および *Vc* の組み合わせに対応する *d* を考慮した緩衝包装設計が必要であると考えられた。しかし、多段積み包装された被包装物の繰り返し衝撃による蓄積疲労損傷の制御に関する検討事例はない。

そこで本章では、多段積み包装された被包装物の段ごとの *d* を考慮した損傷制御方法について検討することとした。実輸送における包装設計を想定した場合、損傷制御方法には、簡易であること、低コストであることおよび機械化された包装工程に対応可能であることなどが望まれる。これらの点を考慮した場合、既に衝撃対策として提案されている、包装容器の内面に緩衝材を配置する方法[1)]や個々の物品自体を緩衝材で梱包する[2)]方法は応用しにくい。そこで、多段積み包装における包装容器と包装容器の間もしくは包装全体の最底面へ板またはシート状の緩衝材を配置することによる、各段における *d* の制御について検討した。

6.2　理　論

6.2.1 重回帰分析による *Vc* および *PAcc* の組み合わせから推定される *d* の算出

本章においては、最初に多段積み包装における段と段との間、および１段目（最下段）の箱底に緩衝材を配置することによって、各段における *Vc* と *PAcc* の組み合わせを変化させることが可能であるかどうかを調査し、次に、それらの組み合

わせの変化によって、各段における *d* を変化させることができるかどうかを検証することとした。第 4 章の検討結果に基づき、各 *d* に対応する DBC が存在すると仮定した場合、*d* は *Vc* と *PAcc* の 2 要因により決定される。この点に着目し、*Vc* および *PAcc* を説明変数、*d* を目的変数とした重回帰分析を行い、*Vc* および *PAcc* に対応する *d* の推定を行うこととした（**Fig. 6-1**）。この推定における重回帰式は、以下の通りである。

$$d = aVc + bPAcc + c \qquad \text{式(6-1)}$$

ここで *a*、*b* および *c* は定数である。なお、本章において重回帰分析は、あくまで *Vc* および *PAcc* に対応する *d* を推定するための目的で使用しており、これを用いて DBC を導出することは不可能である。

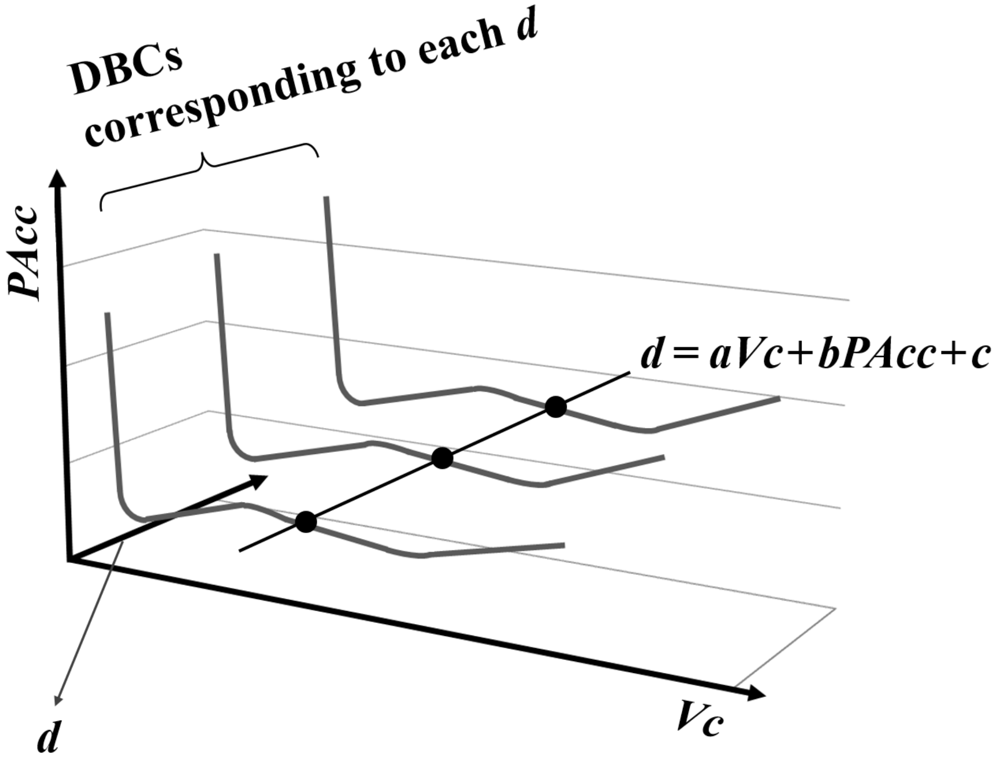

Fig. 6-1 Estimation of *d* values corresponding to *Vc* and *PAcc* by multiple regression analysis

第５章におけるイチゴ果実の損傷評価結果より得られた *Vc*、*PAcc* および *d* の値（**Table 6-1**）を式（6-1）に代入し、重回帰式を求めた。さらに、得られた式の有意性を検証するために分散分析（Analysis of Variance。ANOVA）を行った。いずれの統計解析も、統計処理ソフトウェア（エクセル統計 2012、社会情報サービス）を用いて実施した。

Table 6-1
Data of *Vc*, *PAcc*, and *d* of strawberry fruit for multiple regression analysis

Layer[z]	*h* (m)	*Vc* ($m\ s^{-1}$)	*PAcc* ($m\ s^{-2}$)	*d*
1	0.03	0.94[y]	194.7[y]	0.022[x]
	0.05	1.49	313.4	0.028
	0.10	1.87	442.0	0.052
	0.15	2.22	624.8	0.066
	0.20	2.56	914.1	0.092
	0.25	3.02	989.7	0.115
2	0.05	1.48	139.2	0.022
	0.10	1.95	260.9	0.037
	0.15	2.32	371.6	0.052
	0.20	2.55	498.6	0.061
3	0.05	1.65	124.5	0.021
	0.10	2.07	220.9	0.029
	0.15	2.50	386.6	0.058
	0.20	2.78	421.1	0.070
4	0.05	1.68	107.5	0.020
	0.10	2.14	210.4	0.031
	0.15	2.77	340.3	0.058
	0.20	3.06	450.5	0.070
5	0.05	1.66	117.8	0.029
	0.10	2.46	177.7	0.035
	0.15	2.91	284.3	0.047
	0.20	3.42	459.3	0.077

[z]1: Bottom of five-layered corrugated fibreboard boxes
5: Top of five-layered corrugated fibreboard boxes

[y]Obtained from 11-12 replications

[x]Obtained from 5 replications

6.3 実　験

6.3.1 板状緩衝材を用いた落下試験における *Vc* および *PAcc* の測定条件

Vc および *PAcc* の計測およびダミーサンプルの条件は、第 4 章および第 5 章に準じた。

各段における *Vc* および *PAcc* を制御するための緩衝材は、容易に入手可能なものであるとともに包装全体の重量を大きく変えることがなく、かつ荷崩れを誘発しにくい素材であることが望ましい。これらの要件を満たす素材として、発泡プラスチック板（Foamed Plastic Board。以下、FPB)、プラスチック段ボール板（Corrugated Plastic Board。以下、CPB）および発泡ゴムシート（Foamed Rubber Sheet。以下、FRS）を選定し（**Fig. 6-2**)、緩衝材として使用することとした。使用した各緩衝材の特性を **Table 6-2** に示す。緩衝材の厚さは、いずれも 5 mm とした。

各緩衝材は、段と段との間もしくは、1 段目の箱底に配置した（**Fig. 6-3**)。各緩衝材を 1 段目の箱底に配置した場合を‘0-1’区とし、1 段目と 2 段目との間に配置した場合を‘1-2’区、2 段目と 3 段目との間に配置した場合を‘2-3’区、3 段目と 4 段目との間に配置した場合を‘3-4’区、および 4 段目と 5 段目との間に配置した場合を‘4-5’区とした。

イチゴ果実に類似した損傷特性を有するオウトウ果実の輸送において、$h = 0.2$ m に相当する衝撃が印加された場合、1 回の衝撃で損傷する可能性が示唆されている[3)]。また、第 2 章では 1 段目に収納されたイチゴ果実において同様の結果が得られた。これらの点を踏まえ、本章では、$h = 0.1$ m とした。いずれの緩衝材を使用した場合においても、‘0-1’区においては、緩衝材と落下面との間の距離が 0.1 m となるようにした。*Vc* および *PAcc* の計測条件ならびに落下面の素材は、第 4 章および第 5 章に準じた。緩衝材を使用しない条件を対照区とした。対照区については、*Vc* および *PAcc* の計測は行わず、第 5 章で得られた各段における *Vc* および *PAcc* の値（第 5 章・**Fig. 5-3**、**Fig. 5-4**、**Table 5-1** および **Table 5-2**）を用いた。反復数は 5～6 とした。

6.3.2　各段における d の推定

6.3.1 で得られた Vc および $PAcc$ の値を式（6-1）に代入し、各段における d 値を推定した。また、包装全体の最底面および各段ボール箱の間に板状の素材を配置した場合における各段の d 値についても、同様に推定した。さらに、それらの推定結果より、包装全体における d の最大値（d_{Max}）および平均値（d_{Av}）を算出した。

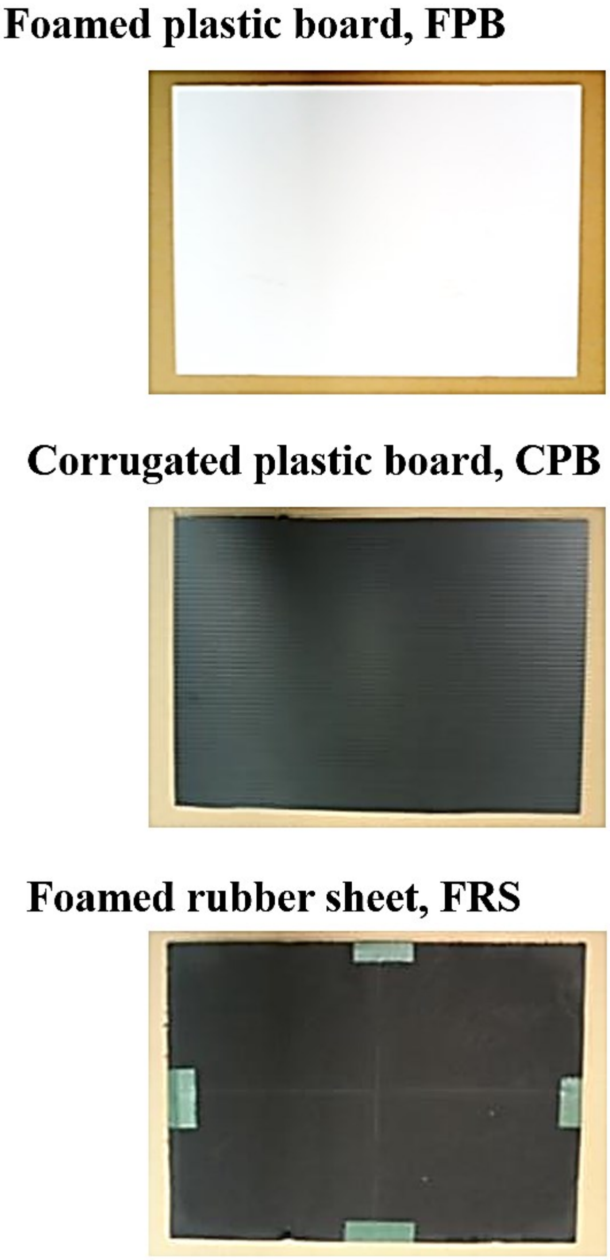

Fig. 6-2 Cushioning materials for controlling Vc and $PAcc$

Table 6-2

Specifications of tested materials for controlling *Vc* and *PAcc*

Material	Made from...	Density (kg m^{-3})[z]
Foamed plastic board, FPB	Polyvinyl chloride	539.5 ± 0.6[y]
Corrugated plastic board, CPB	Polypropylene	909.1 ± 0.7[y,x]
Foamed rubber sheet, FRS	Natural rubber	319.1 ± 6.4[y]

[z]Each value was measured with a gas pycnometer (AccuPyc II 1340, Micrometrics, USA)

[y]Average ± standard deviation (n = 10)

[x]Value of the material (polypropylene) in itself

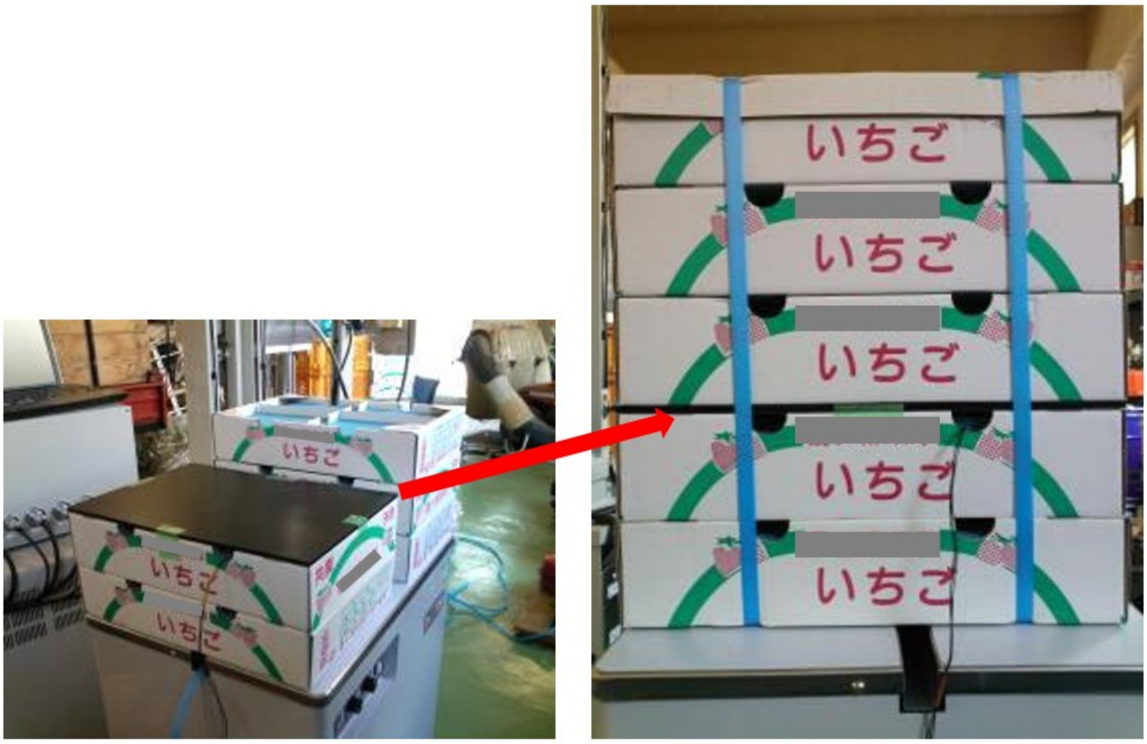

Fig. 6-3 Cushioning material for controlling *Vc* and *PAcc*; corrugated plastic board is laid between the second and third layers (CPB-2-3).

6.4. 実験結果および考察

6.4.1 重回帰分析による *Vc* および *PAcc* の組み合わせに対応する *d* の推定

Table 6-1 に示した *Vc*、*PAcc* および *d* に関するデータを用いた重回帰分析を行ったところ、以下に示す重回帰式が得られた。

$$d = 0.0151Vc + 0.0000785PAcc - 0.0132 \ (r = 0.9848) \qquad 式(6\text{-}2)$$

式（6-2）は、高い相関係数をともなっており、*Vc* もしくは *PAcc* のいずれかの値が大きくなるに従い、もう一方の値も大きくなることがわかる。また、この式の有意性を分散分析により解析したところ、有意性を示す *P* 値は 3.68×10^{-15} と非常に小さな値となり、式(6-2)は高い信頼性を有しているものと判断できた。この分析結果を踏まえた上で、式(6-2)を、各緩衝材を段ボール箱の間もしくは 1 段目の箱底に配置した際における段ごとの *d* の推定に用いることとした。

6.4.2 各緩衝材およびそれらを配置する部位が各段における *Vc* および *PAcc* に及ぼす影響

各緩衝材を各段に配置した際における *Vc* および *PAcc* の値をそれぞれ **Table 6-3** および **Table 6-4** に示す。いずれの条件においても *Vc* の値は、上段になるほど大きくなる傾向を示し、第 5 章で得られた結果と一致した。また、緩衝材の使用により、*Vc* および *PAcc* の組み合わせを様々に変化させることができた（**Fig. 6-4**）。この結果は、包装全体もしくは各段における段ボール箱をバネの一種と仮定した場合、緩衝材を各段に配置することにより、包装全体もしくは段ごとの段ボール箱の剛性が変化したことを示している。

多段積みされた被包装物に正弦半波衝撃パルスを印加した際に、衝撃加速度伝達率が下段と上段とで逆転、すなわち下段と比較し、上段で *PAcc* が大きくなる現象が報告されている[4)]。本章においても、緩衝材の違いおよびその配置場所の違いにより、下段と上段とで *PAcc* の大小が逆転する箇所がみられたが、緩衝材の使用により衝撃加速度伝達率が様々に変化したことに起因したものと考えられた。

Table 6-3

Effects of each cushioning material and its position on the *Vc* (m s^{-1}) at each layer (Drop height: 0.1 m)

Cushioning material	Position of each material	Layer 1	2	3	4	5
No material (Control)^z	-	1.87 ± 0.03^y	1.95 ± 0.03	2.07 ± 0.04	2.14 ± 0.02	2.46 ± 0.03
FPB	0-1	1.73 ± 0.03	2.07 ± 0.03	2.08 ± 0.03	2.30 ± 0.05	2.51 ± 0.08
	1-2	1.87 ± 0.05	1.93 ± 0.04	2.18 ± 0.02	2.43 ± 0.03	2.53 ± 0.03
	2-3	1.86 ± 0.06	1.90 ± 0.01	1.92 ± 0.03	2.43 ± 0.06	2.42 ± 0.02
	3-4	1.94 ± 0.05	2.34 ± 0.04	2.43 ± 0.04	2.30 ± 0.03	2.60 ± 0.04
	4-5	1.74 + 0.03	2.14 ± 0.02	2.38 ± 0.03	2.52 ± 0.03	2.65 ± 0.04
CPB	0-1	1.61 ± 0.06	2.12 ± 0.02	2.32 ± 0.03	2.34 ± 0.08	2.36 ± 0.09
	1-2	2.06 ± 0.01	1.69 ± 0.03	2.21 ± 0.03	2.35 ± 0.06	2.33 ± 0.05
	2-3	1.83 ± 0.01	1.93 ± 0.04	2.10 ± 0.02	2.14 ± 0.05	2.21 ± 0.03
	3-4	2.16 ± 0.03	2.08 ± 0.04	2.09 ± 0.02	2.37 ± 0.02	2.50 ± 0.03
	4-5	2.11 ± 0.03	2.03 ± 0.02	2.11 ± 0.03	2.37 ± 0.01	2.05 ± 0.07
FRS	0-1	1.77 ± 0.03	2.00 ± 0.02	2.16 ± 0.01	2.30 ± 0.06	2.55 ± 0.05
	1-2	1.82 ± 0.03	1.82 ± 0.03	2.00 ± 0.02	2.35 ± 0.04	2.40 ± 0.05
	2-3	2.10 ± 0.05	1.98 ± 0.02	2.14 ± 0.02	2.45 ± 0.04	2.49 ± 0.07
	3-4	2.05 ± 0.04	2.04 ± 0.01	2.15 ± 0.03	2.32 ± 0.05	2.34 ± 0.05
	4-5	2.09 ± 0.05	2.04 ± 0.02	2.16 ± 0.03	2.24 ± 0.01	2.51 ± 0.03

^{z}Each value was obtained from the results given in chapter 5.

^{y}Average ± standard error (SE; n = 5–6)

Table 6-4

Effects of each cushioning material and its position on the *PAcc* (m s^{-2}) at each layer (Drop height: 0.1 m)

Cushioning material	Position of each material	Layer 1	2	3	4	5
No material (Control)^z	-	442.0 ± 14.5^y	260.9 ± 9.2	220.9 ± 20.5	201.5 ± 8.5	177.7 ± 9.8
FPB	0-1	405.4 ± 7.4	228.1 ± 3.8	205.7 ± 12.3	210.4 ± 8.5	194.5 ± 6.5
	1-2	564.9 ± 26.0	241.0 ± 5.5	222.4 ± 5.9	209.5 ± 3.5	191.4 ± 6.2
	2-3	563.7 ± 8.2	233.1 ± 2.5	215.4 ± 7.5	211.9 ± 3.4	205.0 ± 3.3
	3-4	521.6 ± 11.3	246.6 ± 13.1	268.4 ± 7.4	231.2 ± 11.2	213.0 ± 6.1
	4-5	559.8 ± 17.6	268.0 ± 6.3	264.8 ± 7.1	211.3 ± 5.9	221.9 ± 2.6
CPB	0-1	451.6 ± 8.5	246.1 ± 5.6	237.1 ± 8.3	231.3 ± 8.3	199.8 ± 6.7
	1-2	502.8 ± 13.6	236.6 ± 5.6	206.9 ± 5.2	208.0 ± 4.9	204.1 ± 4.5
	2-3	548.8 ± 21.7	207.2 ± 6.4	193.1 ± 4.8	199.0 ± 3.7	189.3 ± 4.7
	3-4	533.5 ± 29.7	214.4 ± 5.8	238.8 ± 1.8	199.4 ± 6.1	204.6 ± 6.5
	4-5	536.4 ± 12.6	212.2 ± 5.9	212.2 ± 4.7	236.2 ± 4.9	180.6 ± 7.6
FRS	0-1	419.2 ± 10.2	234.3 ± 5.8	232.3 ± 1.4	217.5 ± 3.2	190.6 ± 5.2
	1-2	532.5 ± 17.9	203.6 ± 5.9	192.9 ± 3.6	198.5 ± 1.9	182.0 ± 5.1
	2-3	620.6 ± 30.1	292.1 ± 8.5	206.7 ± 2.0	197.4 ± 4.1	191.8 ± 6.3
	3-4	599.2 ± 8.0	233.7 ± 5.2	269.4 ± 2.6	204.2 ± 3.7	174.9 ± 6.9
	4-5	597.7 ± 20.7	223.4 ± 3.1	245.2 ± 7.5	219.8 ± 7.7	204.1 ± 4.4

^{z,y}Refer to **Table 6-3**

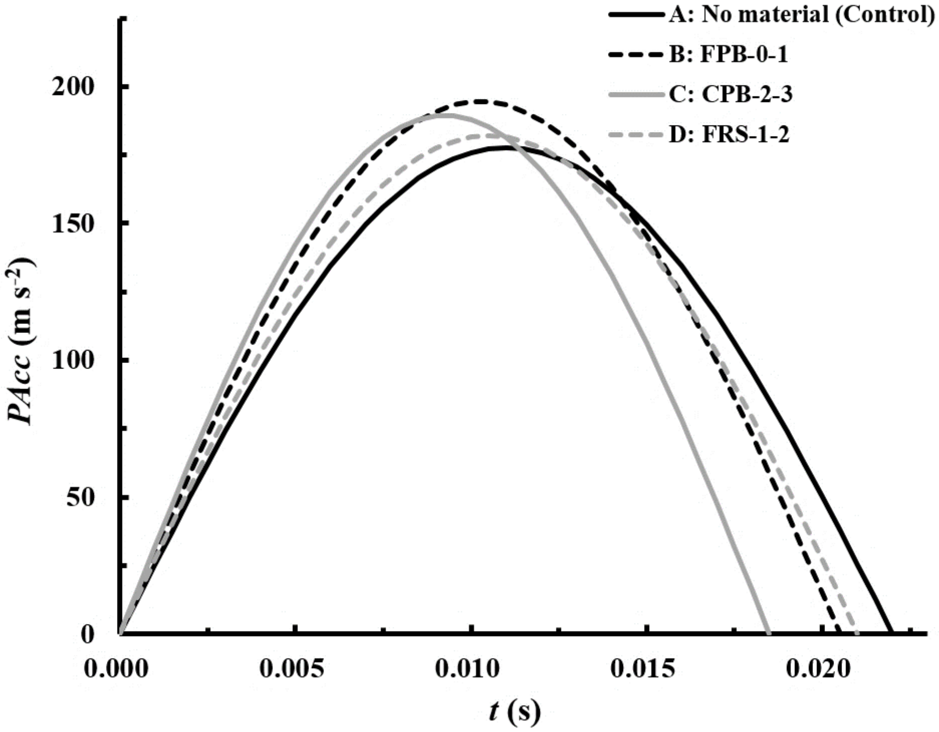

Fig. 6-4 Shock pulses at fifth layer under following conditions: No material (Control; **A**), FPB-0-1 (**B**), CPB-2-3 (**C**), and FRS-1-2 (**D**) The data for 'No material' are taken from chapter 5. The *Vc* values for **A**, **B**, **C**, and **D** are 2.46, 2.51, 2.21, and 2.40 m s^{-1}, respectively.

6.4.3 各段における *d* の推定

Table 6-3 および **Table 6-4** で示した結果を式（6-2）に代入することにより得られた、各緩衝材を配置した際における各段の *d* の推定結果を **Table 6-5** に示す。

いずれの緩衝材を使用した場合においても、1 段目～4 段目における *d* の値は対照区と比較し、大きくなるものと予測された。この理由は、*PAcc* または *Vc* もしくは、それら両方の値が、対照区と比較し大きかったことによるものと推定された。

一方、各緩衝材を配置した場合、2 段目および 3 段目においては対照区と比較し、*Vc* または *PAcc* もしくは、それら両方の値が小さくなる傾向にあった。これにともない、対照区と比較し *d* は減少するものと予測された。これらのことから、FPB の '3-4' および '4-5' 区以外においては、d_{Av} は変化させることができない

ものと推定された。

ここで、FPB の‘0-1’区、CPB の‘2-3’区および FRS の‘1-2’区における各段の d を **Fig. 6-4** に示す。FPB の‘0-1’区における d_{Av} は、対照区と同等であると予測される。しかし、d_{Max} は、対照区と比較し 1 段目における d が小さくなることに付随し、小さくなるものと推定された。また、逆に CPB の‘2-3’区および FRS の‘1-2’区における d_{Max} は、1 段目における d が対照区と比較し大きくなることに付随し、対照区のそれと比較し大きくなるものと予測されたが、2 段目以降における d が対照区と比較し小さくなると予測されたため、d_{Av} は対照区のそれと同等になるものと推定された。

なお、いずれの条件下においても d の推定値にともなう標準誤差の大半は、少数第 4 位以下の値であったため、**Table 6-5** および **Fig. 6-4** においては、標準誤差に関する表示を省略した。

Table 6-5

The d values at each layer estimated with Vc and $PAcc$ values, and Equation (6-2)

Cushioning material	Position of each material	Layer 1	2	3	4	5	Average (d_{Av})	Maximum (d_{Max})
No material (Control)[z]	-	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05
FPB	0-1	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
	1-2	0.06	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
	2-3	0.06	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06
	3-4	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06
	4-5	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06
CPB	0-1	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
	1-2	0.06	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
	2-3	0.06	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06
	3-4	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
	4-5	0.06	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.06
FRS	0-1	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
	1-2	0.06	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06
	2-3	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.07
	3-4	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06
	4-5	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.07

[z]Each value was calculated with Equation (6-2). Therefore, not all values are the same as those given in the chapter 5.

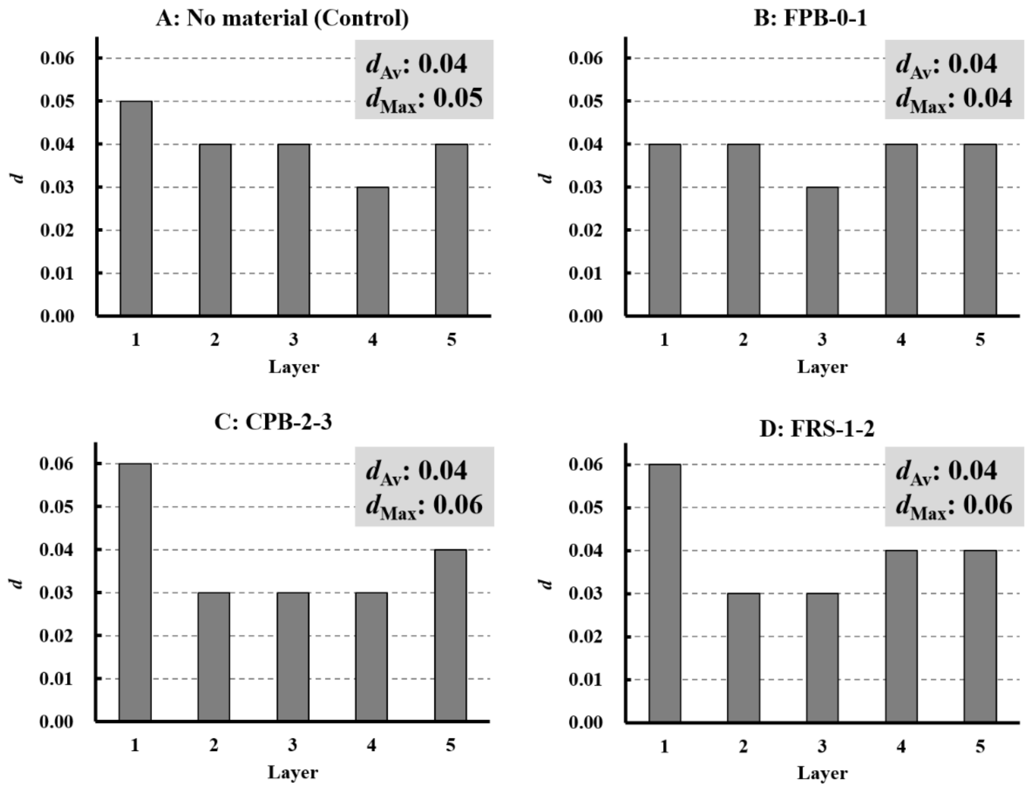

Fig. 6-5 Varying *d* from laying board- or sheet-like cushioning materials at each layer

A: No material (Control), **B**: FPB-0-1, **C**: CPB-2-3, and **D**: FRS-1-2

6.5 結　言

落下試験の結果より、板またはシート状の緩衝材を用いることにより、各段における *Vc* と *PAcc* が様々に変化することを明らかにした。また、これらの変化にともない各段における *d* がどのように変化するのかを重回帰分析を用いて推定し、d_{AV} を変化させることは難しいものの、d_{Max} およびそれが最大となる段を様々に変化させることができる可能性を提示した。

ここで、本章で提示した d_{Max} の制御方法の実用的な応用方法について、蓄積疲労により損傷するイチゴ果実の包装設計を例に述べる。イチゴ果実の果肉硬度は、栽培もしくは収穫の時期[5)]、および品種[6)]といった栽培条件の違いにより変動し、この変動は、衝撃による易損性に大きく影響する[5)]。果実の非破壊方式による果

肉硬度の測定方法が提案されているが[7]、この提案は、果肉硬度の変動を把握し、易損性に応じて果実を選別し出荷先を変えるといった対応に応用することを想定している[8]。一方、本章の結果は、各段において推定される *d* の値を様々に変化させることを可能とするものであり、非破壊方式による果肉硬度に基づく果実の選別方法と組み合わせて使用することにより、繰り返し衝撃に対して異なる易損性を有する果実を混載することを可能にするものと期待できる（**Fig. 6-6**）。緩衝材を使用しない場合でも、段ごとに推定される *d* は複数の値をとるものの（**Table 6-5**）、緩衝材の配置により、その制御範囲は拡大できるものと想定される。

この例が示す通り、本章における検討結果は、異なる易損性を有する蓄積疲労により損傷する被包装物を混載することを可能とし、それらを効率的に輸送することを実現するとともに、繰り返し衝撃による損傷を防止することを可能とする包装設計の実現に貢献するものと結論づけられる。

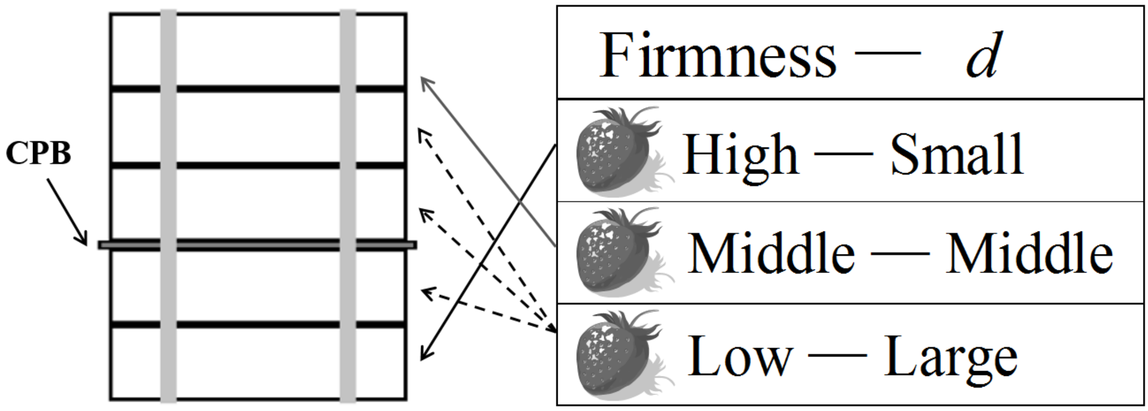

Fig. 6-6 Concept of mixed packaging style for products having different sensitivities to repetitive shock

Here, a corrugated plastic board is laid between the second and third layers of boxes (CPB-2-3; case **C** in **Fig. 6-5**).

参考文献

1) 石川　豊，北澤裕明，高橋和博：オウトウ輸出時に荷物が受ける衝撃力と緩衝効果，日本食品保蔵科学会誌，**38**(3)，135–140 (2012).

2) 今野 勉, 小野寺玲子, 工藤 信, 伊東良久, 石川 豊, 中村ゆり, 羽山裕子: モモ輸出における荷傷み防止方法, 東北農業研究, (63), 107–108 (2010).

3) Ishikawa, Y., Kitazawa, H. and Shiina, T.: Vibration and Shock Analysis of Fruit and Vegetables Transport –Cherry Transport from Yamagata to Taipei–, Japan Agricultural Research Quarterly, **43**(2), 129–135 (2009).

4) 中嶋隆勝, 斎藤勝彦, 久保雅義, 寺岸義春: 段積み・粘弾性支持された製品の線形モデルによる衝撃強さの検討, 日本包装学会誌, **8**(3), 123–134 (1999).

5) 北澤裕明, 佐藤達雄, 石川 豊, 中村宣貴, 椎名武夫: ソフトパックにより包装されたイチゴの損傷発生に及ぼす衝撃の影響, 日本食品保蔵科学会誌, **36**(6), 265–269 (2010).

6) Salentijn, E. M. J., Aharoni, A., Schaart, J. G., Boone, M. J. and Krens, F. A.: Differential gene expression analysis of strawberry cultivars that differ in fruit-firmness, Physiologia Plantarum, **118**(4), 571–578 (2003).

7) 柏嵜 勝, 末永 健, 五月女英平, 中島教博, 大森定夫: イチゴ果実硬度の非破壊測定に関する基礎的研究（第 2 報）—果実表面吸光度スペクトルを用いた果実硬度推定モデルの開発—, 農業機械学会誌, **71**(6), 90–97 (2009).

8) 柏嵜 勝, 末永 健, 五月女英平, 中島教博, 大森定夫: イチゴ果実硬度の非破壊測定に関する基礎的研究（第 1 報）—果実硬度と細胞壁構成成分の関係—, 農業機械学会誌, **69**(6), 49–56 (2007).

第７章　結　論

本研究は、実輸送中における繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷を防止するための包装設計手法を提案することを目的として実施した。

第１章では、1 回の衝撃による物品または被包装物の易損性および蓄積疲労損傷を評価するための理論の現状を述べ、本研究の目的および方針を導出した。

第２章では、蓄積疲労により損傷するイチゴ果実を対象とした繰り返し衝撃印加試験を行い、$PAcc$ と N の関係を S-N 曲線により表すことができることを明らかにするとともに、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価に、この理論が応用できることを実証した。

第３章では、イチゴ果実に衝撃を繰り返し印加した際における、$PAcc$ と対となる Vc の違いが N に及ぼす影響を検証し、繰り返し衝撃による物品の蓄積疲労損傷の発生において、$PAcc$ と Vc の組み合わせにより d が様々に変化することを実証した。また、実輸送における包装条件を想定した上で、蓄積疲労により損傷する被包装物の損傷評価および包装設計を行う場合、それらの組み合わせに対応する d を想定する必要があることを提言した。

第４章では、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の発生に及ぼす $PAcc$ と Vc の組み合わせの影響を、実際にイチゴ果実の輸送に用いられる包装条件下で検証した。繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の評価を、$PAcc$ および d の関係のみにより実施した場合、d の推定値を見誤る危険性を実証し、第３章で得られた結論が実輸送を想定した包装を行った被包装物においても適用できることを証明した。

第５章では、多段積みされた包装形態における段（部位）の違いがイチゴ果実の d に及ぼす影響を検証し、多段積み包装において段の違いにより任意の $PAcc$ に対応する Vc が様々に変化することを明らかにした。さらに、この変化によって d が様々に変化することを実証し、第４章に引き続き、第３章で得られた結論が実輸送で用いられる多段積み包装においても適用できることを証明した。

第６章では、第５章の結果を踏まえ、多段積みされた被包装物の損傷を制御するための実用的な手法として、包装容器と包装容器の間もしくは包装全体の最底面に板またはシート状の緩衝材を配置する方法を検討した。この方法により、

PAcc と *Vc* の組み合わせを様々に変化させることが可能であること、および *d* が最大となる段を様々に変化させることができることを証明した。さらに、この包装容器と包装容器の間もしくは包装全体の最底面に板またはシート状の緩衝材を配置することによる *PAcc*、*Vc* および *d* の制御手法が、多段積み包装における異なる易損性を有する被包装物の混載に応用できることを提案した。

以上の通り本研究では、繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷評価を *PAcc*、*Vc* および *d* の 3 要因を考慮することによって実施しなければならない理由を実輸送で用いられる包装形態を用いた実証試験を通して証明した。さらに、それらの 3 要因を考慮し、かつ実輸送を想定したこれまでにない概念による包装設計手法を提案した。

本研究において損傷評価の対象としたイチゴ果実の他、レモン果実やマンゴー果実などの農産物が繰り返し衝撃を受けた際に蓄積疲労により損傷することが知られている[1)~3)]。このような農産物のための緩衝包装設計などを通して、本研究は繰り返し衝撃による被包装物の蓄積疲労損傷の制御を可能とする輸送包装設計の発展に貢献するものと期待できる。なお、蓄積疲労損傷の発生において非線形の損傷特性を有する被包装物が存在する場合、その損傷防止対策を講じるためには、新規の理論構築とともに、それに基づく評価試験が必要となる。

本研究において提案した損傷制御方法の、実輸送における有効性を検証するためには、実証試験が不可欠である。現在、農林水産省食料生産地域再生のための先端技術展開事業 「被災地における農産物加工技術の実証研究」の一環として、イチゴ果実を対象とした実証試験が進められている。

参考文献

1) 池田裕朗, 石川 豊, 北澤裕明, 路 飛, 赤阪信二, 塩田 俊: 収穫から選果までの間にレモン果実が受ける衝撃解析, 園芸学研究, **9**(1), 107–112 (2010).

2) 池田裕朗, 石川 豊, 赤阪信二, 塩田 俊, 北澤裕明, 路 飛: 収穫後の衝撃がレモン果実貯蔵中の腐敗の発生に及ぼす影響, 園芸学研究, **10**(1), 93–100 (2011).

3) Nakanishi, Y., Nakamura, N., Hasegawa, N., Inamori, H., Ogawa, Y. and Kitazawa, H.: Evaluation and Estimation of Damage to Tree-Ripened

'Irwin' Mangos from Repetitive Shock during Transportation, Tropical Agriculture and Development, (in press).

記号表

d: 衝撃 1 回あたりの損傷度

D: 損傷度

DBC: 損傷限界曲線

e: 反発係数

d_{AV}: 衝撃 1 回あたりの損傷度の平均値

d_{Max}: 衝撃 1 回あたりの損傷度の最大値

g: 重力加速度（$m\ s^{-2}$）

h: 落下高（m）

n: 応力または衝撃の繰り返し回数

N: 損傷発生までの応力または衝撃の繰り返し回数

$PAcc$: ピーク加速度（$m\ s^{-2}$）

S: 応力

t: 衝撃作用時間（s）

Vc: 速度変化（$m\ s^{-1}$）

謝 辞

本研究の遂行およびそのとりまとめにあたり、多大なる御指導と御助言を賜った国立大学法人 神戸大学大学院海事科学研究科教授 齋藤勝彦博士に心から感謝の意を表し厚く御礼申し上げる。また、本論文の査読および校閲に関する数多くの御助言を賜った国立大学法人 神戸大学大学院海事科学研究科教授 阿部晃久博士および同教授 河口信義博士に厚く御礼申し上げる。

本研究のきっかけを賜るとともに、その遂行において有益な御助言および御協力を賜った、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所企画管理部業務推進室長 石川 豊博士および国立大学法人 千葉大学大学院園芸学研究科教授 椎名武夫博士に厚く御礼申し上げる。

本研究を遂行するにあたり、多大なる御協力を賜った国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所 食品工学研究領域主任研究員 中村宣貴博士および同研究助手 長谷川奈緒子氏ならびに国立大学法人 茨城大学農学部附属フィールドサイエンス教育研究センター准教授 佐藤達雄博士に厚く御礼申し上げる。

本研究の一部は、国立大学法人 神戸大学海事科学部 輸送包装研究室ゼミにおける研究状況報告とそれに付随した同ゼミ参加者との議論を通して進めた。同大学海事科学部 学部生、同大学大学院海事科学研究科 専攻生、および輸送包装に関連する企業および法人所属の参加者各位に厚く御礼申し上げる。

本論文の推敲に関する数多くの御助言を賜った国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所 食品工学研究領域上席研究員 永田雅靖博士に厚く御礼申し上げる。

第2章は、農林水産省 新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業 「国産果実の輸出促進に向けた低コスト生産・流通システムの開発(課題番号:1913)」の一部として、同事業より資金提供を受けて実施した。ここに記して厚く御礼申し上げる。

第3章は、文部科学省および日本学術振興会 科学研究費補助金若手研究(B)「損傷限界曲線を応用した新たな緩衝包装設計理論の構築と青果物輸送包装の最適化(課題番号:21780236)」の一部として、同制度より資金提供を受けて実施

した。ここに記して厚く御礼申し上げる。

第6章は、農林水産省 食料生産地域再生のための先端技術展開事業「被災地における農産物加工技術の実証研究」の一部として、同事業より資金提供を受けて実施した。ここに記して厚く御礼申し上げる。